ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
ПРИ ГОСПЛАНЕ СССР

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УНИПОЛЯРНЫЕ МАШИНЫ

Под редакцией Л. А. Суханова

ВНИИЭМ
ОТДЕЛЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, СТАНДАРТИЗАЦИИ
И НОРМАЛИЗАЦИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Москва 1964

УДК 621.313.291

Авторы:
*Л. А. Сиханов, Р. Х. Сафиуллина, Ю. А. Бобков*

**(ТС-1)**

Редактор Отделения ВНИИЭМ *Мистюкова Е. М.*
Корректоры *Дьячкова Э. Г., Козлова Т. В.*
Техн. редактор *Кукушкина З. М.*

Т-18513. К печати 14/XII-64 г. Объем печ. 8,5 л. Уч.-изд. 8,16 л
Формат бум. 60×92¹/₁₆. Тираж 3800. Цена 41 к. Подписное. Зак. 1618

ВНИИЭМ — отделение научно-технической информации, стандартизации и нормализации в электротехнике
Москва, Е-123, 2-й Плехановский туп., 12

# ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие ряда отраслей промышленности и новейшей техники за последние 10—15 лет потребовало создания установок на весьма большие постоянные токи, измеряемые сотнями килоампер. В большинстве случаев подобные установки являются низковольтными. В этих условиях для электрических униполярных машин открылись широкие перспективы практического использования, так как именно указанный тип источника позволяет сравнительно простыми и экономичными средствами генерировать без пульсаций постоянный ток большой величины. В связи с этим к униполярным генераторам был снова проявлен повышенный интерес исследователей, благодаря чему оказалась успешно решенной проблема токосъема, который долгое время сдерживал развитие униполярных машин. Использование новых жидкометаллических сплавов, обладающих низкими температурой плавления и вязкостью при высокой электрической проводимости, позволили разработать экономичные, малогабаритные токосъемные устройства, допускающие высокие плотности тока в контакте. Это дало возможность построить весьма мощные униполярные генераторы, которые сочетали лучшие качества, присущие машинам данного типа: простоту и надежность конструкции, малые габариты и высокие технико-экономические показатели, генерирование напряжения и тока без пульсаций, высокую термическую и перегрузочную способность по току, отсутствие изнашивающихся частей в силовой цепи и т. д.

В последние годы за рубежом был сделан ряд уникальных установок с униполярными генераторами, в которых для съема больших токов использован жидкометаллический контакт.

По характеру работы эти установки можно разделить на две группы:

1) для длительных стационарных режимов;

2) для импульсных режимов в течение сравнительно небольшого промежутка времени.

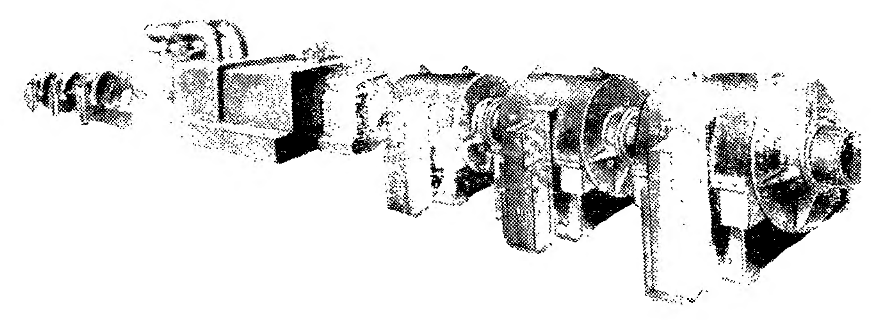


Рис. 1. Генерирующая установка мощностью 60 *Мвт* с шестью униполярными генераторами

Целесообразно кратко рассмотреть назначение некоторых установок и основные данные входящих в них униполярных генераторов.

Примером стационарной установки может служить агрегат, который состоит из паровой турбины и шести униполярных генераторов мощностью по 10 *Мвт* каждый [43]. На рис. 1 видно, что генераторы находятся на одном валу с турбиной (по три с каждой стороны). При скорости вращения 3600 *об/мин* каждый генератор обеспечивает напряжение 67 *в* и рассчитан на длительный ток, равный 150 *ка*. Электрические цепи якорей при последовательном соединении позволяют получить рабочее напряжение 400 *в* при токе 150 *ка*.

Подобные установки могут быть использованы в металлургической и химической промышленности, в частности для получения электролизом алюминия, меди и других металлов; для питания дуговых печей и электромагнитных насосов, перекачивающих жидкий металл; получения хлора и т. д. Электромагнитные насосы применяются, например, с целью обеспечения циркуляции теплоносителя в атомных реакторах.

Указанные униполярные генераторы построены фирмой GEC (США) и прошли испытание на заводах в г. Скенектеди. По сообщению фирмы, к. п. д. генератора весьма высок — более 98%, вес 25 *т*; габариты: длина — 3,56 *м* (включая муфты сцепления), высота — 1,78 *м*, ширина — 2,56 *м*. Униполярный генератор рассчитан на работу в течение нескольких лет без остановки для ухода и ремонта. Вспомогательные агрегаты находятся вне генератора и допускают использование резервных устройств без остановки машины.

На рис. 2 показаны униполярные генераторы, которые входят в силовую установку аэродинамической трубы (г. Тулахома, США). Труба служит для испытаний в потоке горячих газов моделей управляемых снарядов и космических летательных аппаратов [69]. Каждый из генераторов при скорости вращения 1800 *об/мин* развивает напряжение 45 *в* и способен обеспечить рабочий ток в 550 *ка*.

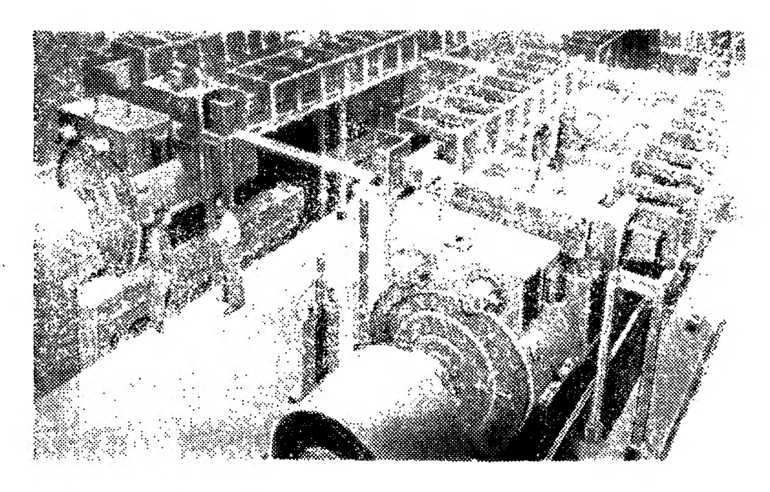


Рис. 2. Силовая установка с четырьмя униполярными генераторами (по два на одном валу) для аэродинамической трубы

Внешний вид машины, построенной фирмой GEC, показан на рис. 3. Униполярные генераторы в этой установке используются для зарядки индуктивной катушки, которая затем при разряде через электрическую дугу в течение 0,01 *сек* обеспечивает пик тока до 1000 *ка*. Скорость воздуха в аэродинамической трубе достигает двацатикратной скорости звука.

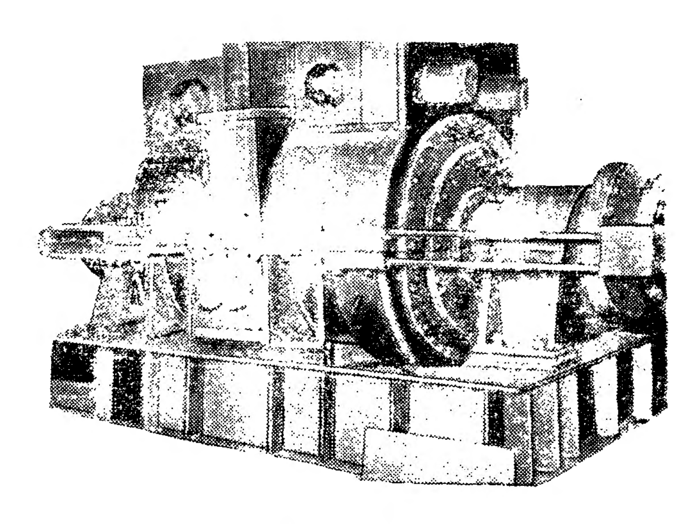


Рис. 3. Внешний вид мощного униполярного генератора фирмы GEC

В настоящее время имеется целый ряд подобных униполярных генераторов, также предназначенных для импульсных режимов. Например, в Мичиганском университете для аэродинамической трубы используется генератор с номинальным током 60 *ка* и пиковым 300 *ка*. Он развивает напряжение 40 *в* при относительно высокой скорости вращения, равной 10 000 *об/мин*

Другой важной областью применения мощных униполярных генераторов являются экспериментальные установки ядерной физики, главным образом для питания обмоток электромагнитов. По-видимому, они найдут применение для аналогичной цели в магнитогидродинамических генераторах.

Исследовательский центр NASA (США) применяет униполярный генератор для создания сильных магнитных полей (до 10 *вб/м*²). Форсирование возбуждения генератора позволяет достигнуть максимального тока в 300 *ка* за 1 *сек*.

Уникальный униполярный генератор вертикального типа (рис. 4) был построен и испытан в Австралийском национальном университете (г. Канберра). Генератор предназначен для питания обмоток магнитов протон-синхротрона на 10 млрд. электрон-вольт [71]. В импульсном режиме он способен обеспечить ток до 1600 *ка* при начальном напряжении 800 *в*. Генератор имеет два дискообразных ротора диаметром около 3,54 *м* и весом 40 *т* каждый, которые раскручиваются в противоположных направлениях до скорости 900 *об/мин*. Общий вес машины очень большой — 1500 *т*.

Выше были рассмотрены только наиболее мощные современные установки, где нашли применение униполярные генераторы. Кроме того, имеется большое количество индивидуальных униполярных машин (включая двигатели) на относительно меньшие токи, отличающиеся специфическими параметрами (высокоскоростные, на повышенное напряжение — до 550 *в* с малым моментом инерции и т. д.). Их практическое использование может быть весьма разнообразным, например, для исследования коммутационной аппаратуры, в качестве двигателей при питании от низковольтных источников, а также в виде датчиков напряжения без пульсаций для шлейфов осциллографа взамен тахогенераторов и т. д.

Целью настоящего обзора является ознакомление научно-технических работников с этапами развития униполярной машины, ее конструктивными особенностями и методами расчета, так как в настоящее время не имеется обобщающей работы по униполярным машинам. Необходимо указать, что ряд основных вопросов по методу расчета подобных машин и их переходных режимов, несмотря на определенные практические достижения в ряде стран, в литературе недостаточно освещены. В связи с этим в книге дан подробный теоретический анализ таких первостепенных вопросов, как расчет потерь в жидкометаллическом контакте, анализ устойчивости положения жидкости в

контактной зоне при токовых перегрузках, методика расчета намагничивающей силы на сталь ротора, выбор оптимальных размеров машины и контактной зоны. Этот материал включает самостоятельные разработки.

Применена система единиц МКСА за исключением случаев, специально оговоренных.

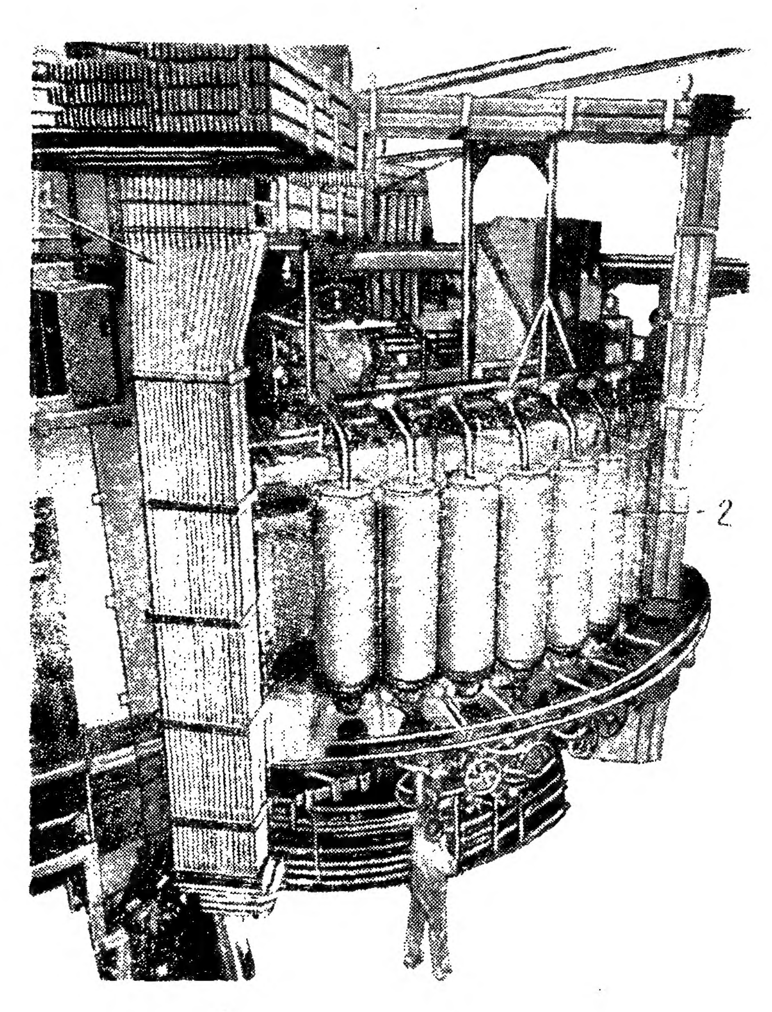



Рис. 4. Внешний вид импульсного униполярного **генератора** Австралийского национального университета
*1* — шинопровод, *2* — баки со сплавом NaK

# I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ УНИПОЛЯРНОЙ МАШИНЫ

Действие униполярной машины основано на принципе электромагнитной индукции, открытом М. Фарадеем еще в 1831 г. В результате исследований явления электромагнитной индукции знаменитый физик построил лабораторную модель, которую наряду с известным «колесом Берлоу» можно считать прообразом современных униполярных машин. Эта модель состояла из медного диска, который приводился во вращение между полюсами подковообразного магнита, и двух скользящих контактов. Для получения наибольшего напряжения на контактах один из них был расположен у края диска, а второй — около оси вращения (рис. 5).

На рис. 6 схематически показан другой возможный вариант модели, когда цилиндрический магнит вращается вокруг своей оси. С боковой поверхности цилиндра и вала напряжение снимается при помощи двух щеток.

В прошлом веке по поводу принципа действия подобной системы велась длительная дискуссия. Дело в том, что напряженность магнитного поля в пространстве для рассматриваемого случая не изменяется во времени, поэтому трудно объяснить возникновение э. д. с. в контуре *PGO*. В то время многие ошибочно отождествляли вращение магнита с вращением его магнитных силовых линий. Магнитные силовые линии являются вспомогательным понятием и не могут рассматриваться в виде каких-то материальных образований [32]. Для строгого обоснования принципа действия приведенных выше схем (как это было позже показано) необходимо привлечение теории относительности, а также понятия о так называемой лоренцовой силе [27, 32, 77]. Такие методы анализа выходят за рамки настоящего обзора.

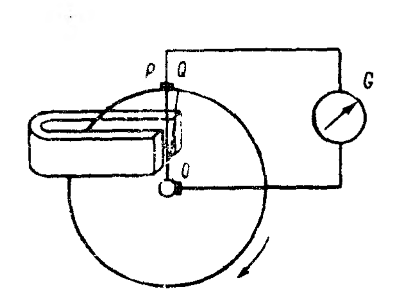


Рис. 5. Схема дисковой модели униполярной машины

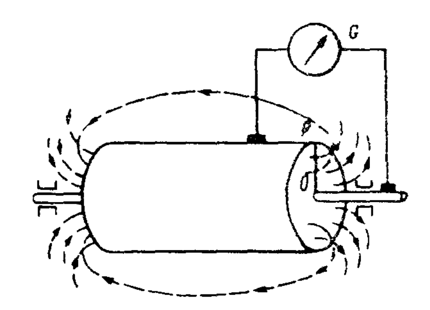


Рис. 6. Схема цилиндрической модели униполярной машины

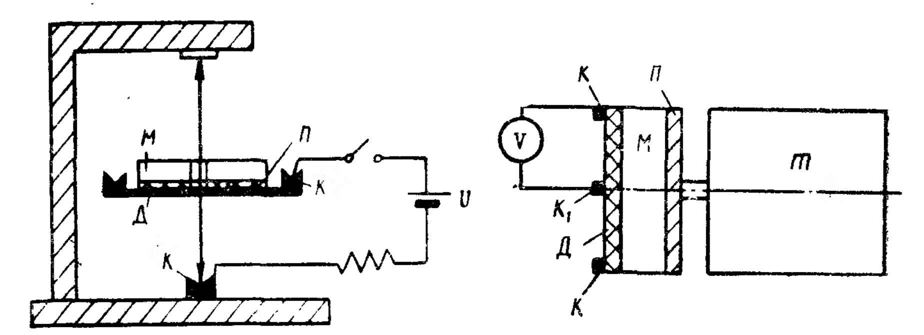



Рис. 7. Экспериментальная дисковая модель Дас Гупта

Рис. 8. Вторая экспериментальная модель Дас Гупта

Ниже приведены некоторые опубликованные в последнее время интересные физические опыты, способствующие более глубокому пониманию действия униполярных машин [54].

Схема первой лабораторной модели показана на рис. 7. Она состоит из дискообразного магнита *М*, медного диска *Д*, контактных ртутных устройств *К*, немагнитной прокладки *П*. Модель подключалась к источнику постоянного тока и работала в режиме двигателя. При различных значениях тока измерялся электромагнитный вращающий момент диска для двух следующих случаев:

а) магнит закреплен на диске и вращается вместе с ним;

б) магнит неподвижен (подвешен на нитях к верхней стойке, а прокладка *П* удалена).

Полученные из опыта зависимости электромагнитных моментов от токов практически совпали. В случае «б» магнит *М* не испытывал момента реакции (нити не закручивались).

Схема второй лабораторной модели приведена на рис. 8. Медный диск *Д* и дискообразный магнит *М* могут приводиться во вращение от вспомогательного двигателя *m*. Чувствительный вольтметр подключен с помощью двенадцати щеток *К* к периферии медного диска и одной щеткой $K_1$ к оси вала. Измерения напряжения были произведены для следующих трех случаев:

а) диск неподвижен, магнит вращается со скоростью $n_1$;

б) диск и магнит вращаются со скоростью $n_1$;

в) магнит неподвижен, диск вращается со скоростью $n_1$.

В случае «а» напряжение отсутствовало, в случаях «б» и «в» в диске индуктировались напряжения, равные по величине. Описанные опыты показывают, что наведение э. д. с. в диске не связано с вращением магнита.

Вывод формул для определения э. д. с. в униполярных машинах основывается на общепризнанном упрощенном рассмотрении физических явлений, которые тем не менее дают правильные количественные результаты.

Предположим, что диск с радиусом $R$ (см. рис. 5) вращается с равномерной угловой скоростью $\omega$, а магнитное поле направлено вдоль оси и распределено равномерно по всей поверхности диска с индукцией, равной $B$. Если в некоторый момент времени воображаемый луч занимал положение $OP$ (см. рис. 5), а спустя промежуток времени $dt$ переместился в положение $OQ$, то изменение магнитного потока в результате искажения контура $OPG$ в $OQG$ составит

$$d\Phi = -B\cdot\frac{1}{2}\ R\,(\omega R)\cdot dt.$$

Тогда э. д. с., наведенная в контуре, будет

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2}\ BR^2\,\omega.$$

Учитывая, что линейная скорость на окружности диска $v = R\omega$, найдем

$$e = \frac{1}{2}\ BRv. \qquad (1)$$

Аналогичный результат получается, если определить э. д. с. из условия пересечения магнитного потока отрезком радиуса $\Delta R$, а именно

$$e = \int_0^R B\cdot\omega R\cdot dR = \frac{1}{2}\ BRv.$$

Если линейную скорость вращения выразим через число оборотов диска в секунду

$$v = 2\pi Rn,$$

то после подстановки в (1) найдем

$$e = BnS, \qquad (2)$$

где $S$ — площадь диска, которая пронизывается магнитным потоком.

Уравнение (2) можно представить в следующем удобном виде

$$e = n\Phi. \qquad (3)$$

Таким образом, электродвижущая сила, которая индуктируется во вращающемся диске, пропорциональна скорости вращения диска и пронизывающего его магнитного потока. Например, если $\Phi = 0{,}1$ *вб*, $n = 50$ *1/сек*, то $e = 5$ *в*.

Как уже отмечалось, несмотря на вращение цилиндрического магнита, его поле не изменяется во времени. Применяя ранее высказанные рассуждения к лучу $OP$ (см. рис. 6), перемещающемуся вместе с ротором относительно поля, придем к выводу, что во внешнем контуре должен протекать постоянный ток.

Выше при рассмотрении схем нами предполагалось вращение диска заданным. Схемы подобного типа обратимы в том смысле, что могут работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Электромагнитный вращающий момент, развиваемый машиной, пропорционален произведению тока на рабочий магнитный поток.

## О НЕКОТОРЫХ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ОШИБКАХ

Интересно отметить, что в свое время выдвигался ряд ошибочных проектов униполярных генераторов постоянного тока, которые для лучшего понимания принципа действия униполярных машин рассмотрены ниже.

1. На цилиндрическом роторе закреплялась катушка в виде соосного кольца, которое через пару контактов подключается к внешнему источнику постоянного напряжения. Ток в катушке возбуждения создает магнитное поле вдоль оси цилиндра, которое затем заходит в статор, где размещена соответствующая обмотка. По замыслу авторов, предполагавших, что магнитное поле будет вращаться вместе с вращением катушки, на выводах обмотки статора должно появиться напряжение. В этом случае удалось бы избежать контактных устройств в рабочей цепи.

Заметим, что, наложив соответствующим образом щетки на вращающийся цилиндр, мы получим напряжение независимо от того, вращается катушка возбуждения вместе с ротором или она закреплена на статоре. Скользящие контактные щетки осуществляют как бы поочередное замыкание вращающихся «контуров» цилиндра, наподобие того, как это имеет место в коллекторных машинах постоянного тока [33].

2. Цилиндр с обмоткой возбуждения в виде кольца был неподвижен, а охватывающий его внешний стальной цилиндр вращался. Естественно, что во вращающемся цилиндре должна наводиться э. д. с. Однако следует отметить, что без применения скользящих контактов невозможно получить отдельно от машины синхронно вращающийся вместе с внешним цилиндром контур, по которому будет протекать постоянный ток.

Действительно, соединяя любые две точки внешнего цилиндра проводником, мы получили в образованном таким образом контуре суммарную э. д. с., равную нулю, так как э. д. с., наведенные во вращающихся цилиндре и проводнике, будут равны по величине и направлены навстречу друг другу. Чтобы «вывести» э. д. с. из зоны магнитного поля, необходимы неподвижные, относительно этого поля проводники, а следовательно, необходима, по крайней мере, пара скользящих контактов.

Попытка получить электрический ток без скользящего контакта во вращающемся синхронно с внутренним цилиндром внешнем контуре также не увенчается успехом, так как во вра-

щающихся соединительных проводниках будет наводиться э. д. с., полностью компенсирующая э. д. с. ротора.

В [22] дан пример заблуждения, связанный с попыткой создать схему высоковольтного генератора.

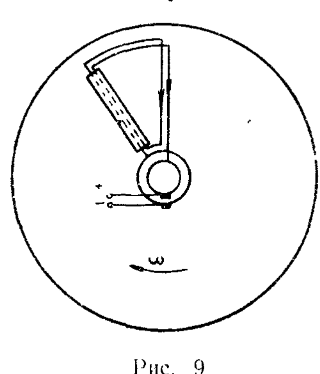


Рис. 9

На рис. 9 показан медный диск с двумя контактными кольцами на валу. Предположим, что диск вращается в магнитном поле, направленном вдоль его оси. На диске уложены витки обмотки, начало и конец которой выведены на кольца. Одна из сторон обмотки заключена в трубку из ферромагнитного материала с целью экранирования проводников от поля. Может показаться, что в этой части обмотки магнитная индукция будет ослаблена, в то время как на стороне, не защищенной экраном, будет индуктироваться э. д. с., пропорциональная числу проводников в катушке. Однако, поскольку магнитные силовые линии непрерывны, то при вращении диска стороны проводников, заключенные в экранирующей трубке, будут пересекать эти линии точно так же, как и свободные от экрана проводники. В связи со взаимно противоположным направлением э. д. с. в контуре, естественно, напряжение на кольцах будет отсутствовать.

## О ПРИМЕНЕНИИ ФОРМУЛЫ Д. МАКСВЕЛЛА

Выше при рассмотрении образования электродвижущей силы мы пользовались законом электромагнитной индукции в трактовке, данной М. Фарадеем, т. е. связывали возникновение э. д. с. с пересечением силовых линий магнитного поля проводником. В случае применения методики, данной Д. Максвеллом, когда возникновение э. д. с. связывается со скоростью изменения магнитного потока, охваченного замкнутым контуром, возникают некоторые трудности, которые целесообразно пояснить.

Как известно,

$$e = -\frac{d\Phi}{dt},$$

поэтому для получения постоянства э. д. с. приходим к выводу о необходимости **неограниченного** нарастания во времени по линейному закону магнитного потока

$$\Phi = kt + \Phi_0.$$

Поскольку в действительности имеет место постоянство магнитной индукции, то остается допустить, что величина эквивалентной поверхности $S_э$ контура должна линейно возрастать во времени. Из выражения (2) следует, что $S_э = nS$.

Для уточнения понятия эквивалентной поверхности, рассмотрим на рис. 6 контур, который образуется левой щеткой, неподвижной внешней цепью, правой щеткой, валом, и, наконец, воображаемым вращающимся проводником $OP$. Поскольку магнитное поле неподвижно в пространстве, то во внешней цепи не индуктируется э. д. с. — эта цепь является пассивной. Активной частью контура является проводник $OP$, который вследствие вращения как бы непрерывно изменяет контур, увеличивая его «эквивалентную» поверхность.

Можно дать другую интересную трактовку рассматриваемого вопроса, а именно: предположим, что за счет вращения подвижной части контура (между левой щеткой и валом) происходит как бы непрерывная намотка витков, которые охватывают осевой магнитный поток цилиндра. Это подсказывает еще одну возможность (пока теоретическую) создания оригинального генератора. Действительно, если взять цилиндрический магнитопровод, вдоль оси которого проходит поток, и начать наматывать на его поверхность витки ($w$) со скоростью $n$, то из-за нарастания потокосцепления катушки

$$\psi = w\Phi$$

на ее концах будет индуктироваться э. д. с. $e = n\Phi$, так как $w \equiv n$.

Следует отметить, что в этом случае можно обойтись только одним скользящим контактом.

В заключение необходимо пояснить, почему электрические машины, построенные по принципу описанных выше схем, получили название «униполярных». Это название неоднократно подвергалось критике и в ряде стран оно уступило место названию «однополярные» с добавлением «ациклические». Этими названиями стремятся передать то обстоятельство, что как распределение индукции в рабочей зоне ротора, так и направление протекающего тока характеризуются одним направлением в отличие от многополюсных машин, у которых в обмотках якоря имеют место знакопеременные потоки и электрический ток. Термин «ациклический» поясняет, что поток и ток являются функциями непериодическими. В свое время были распространены для получения электрического тока повышенной частоты циклические униполярные машины. Например, такая машина может быть построена по следующей схеме: диск с радиальными отверстиями вращается в магнитном поле нескольких симметрично расположенных магнитов. При вращении в диске будет наводиться однонаправленная пульсирующая э. д. с.

В зависимости от конструкции ротора различают униполярные машины с роторами в виде диска, цилиндра, колокола (барабана). Их особенности более подробно будут рассмотрены ниже.

## II. УНИПОЛЯРНЫЕ МАШИНЫ С ТВЕРДЫМ СКОЛЬЗЯЩИМ КОНТАКТОМ

Униполярная машина является в принципе низковольтной. Она может работать при очень больших токах, правда, возникают известные затруднения с токосъемом.

Повышение напряжения достигается значительным усложнением ее конструкции. При этом теряются основные достоинства — простота и надежность. Ротор униполярного генератора является как бы обмоткой с витками, которые всегда соединены параллельно в отличие от коллекторной машины постоянного тока, где последовательное соединение проводников обмотки может обеспечить необходимое высокое напряжение.

Если принять во внимание, что индукция в магнитной цепи униполярной машины по условию насыщения стали может быть допущена не более 2 *вб/м²*, а линейная окружная скорость литого диска, по соображению механической прочности, не должна превосходить 200 *м/сек*, то при радиусе диска в 1 *м*, согласно выражению (1), для максимальной э. д. с. машины получим величину, равную 200 *в*.

Естественным способом повышения напряжения является последовательное соединение электрических цепей отдельных дисков, при этом желательно избежать дополнительных скользящих контактов. Однако, если это выполнить путем соединения окружности одного диска с центром последующего (рис. 10), то не получим ожидаемого эффекта, так как соединительные проводники явились бы, в свою очередь, носителями встречной э. д. с., равной э. д. с. диска. Вынос соединительного проводника из зоны интенсивного поля (рис. 11) также не дает решения поставленной задачи, так как в проводнике *PQRT* будет индуктироваться встречная э. д. с. от пересечения им потока, который создает протекающий в дисках ток.

Таким образом, для повышения напряжения машины путем последовательного соединения электрических цепей дисков (в случае осевого магнитного потока) необходимы дополнитель-

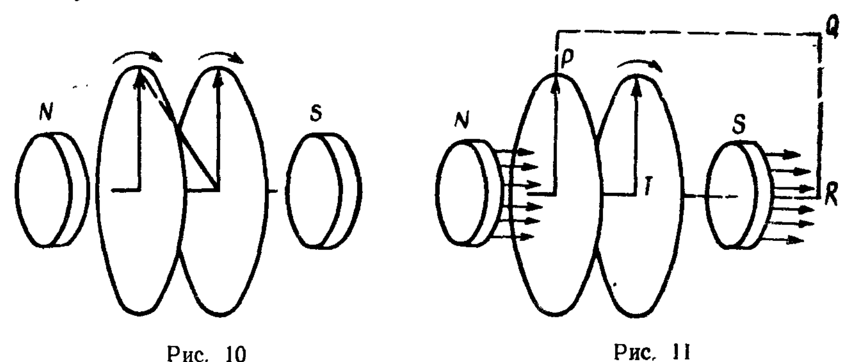



Рис. 10 Рис. 11

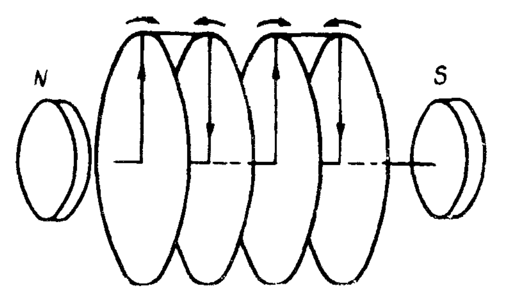



Рис. 12. Способ соединения дисков для сложения индуктированных в них э.д.с.

ные скользящие контакты. На такую возможность указал еще М. Фарадей, предлагавший соединить диски попарно со стороны их окружностей и валов; причем направления вращения смежных дисков должно быть взаимно противоположным (рис. 12). В этом случае происходит сложение э. д. с. в электрической цепи, а магнитные поля от собственных токов дисков компенсируются.

Задачу получения требуемого направления э. д. с. (вместо вращения дисков в разных направлениях) за счет соответствующего направления магнитных полей в зоне каждого диска практически решил Форбс.

## УНИПОЛЯРНЫЕ МАШИНЫ С ДИСКОВЫМ РОТОРОМ

На рис. 13 показан продольный разрез машины, по схеме которой Форбс в 1886 г. построил генератор. Два диска находятся на одном валу. Пара катушек возбуждения *E* в виде колец создают магнитное поле, силовые линии которого пронизывают диски в разных направлениях. В результате э. д. с. дисков суммируются и на скользящих щетках возникает удвоенное напряжение. Эксплуатация первых конструкций униполярных машин показала, что диски целесообразно выполнять стальными в целях снижения требуемой намагничивающей силы обмоток возбуждения и повышения механической прочности дисков. Одновременно была установлена необходимость тщательной компенсации поля от тока нагрузки машины. Это явление принято называть «реакцией якоря». Реакция якоря обычно ослабляет магнитный поток машины, тем самым снижая напряжение на щетках с ростом тока нагрузки.

В униполярной машине Тюри (рис. 14) одним из первых для компенсации реакции тока якоря был применен специальный неподвижный диск *Д'*, расположенный перед вращающимся диском *Д*. Центральная часть вращающегося диска соединялась со скользящим контактом, а наружная — соответственно с неподвижным диском. Таким образом, ток должен пройти по

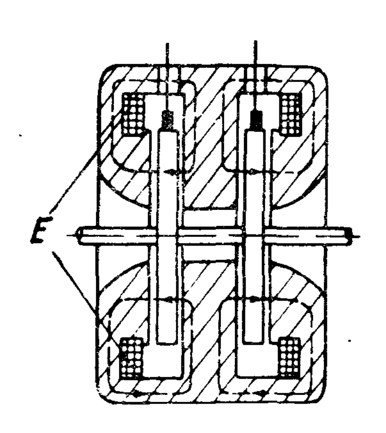



Рис. 13. Дисковая униполярная машина Форбса

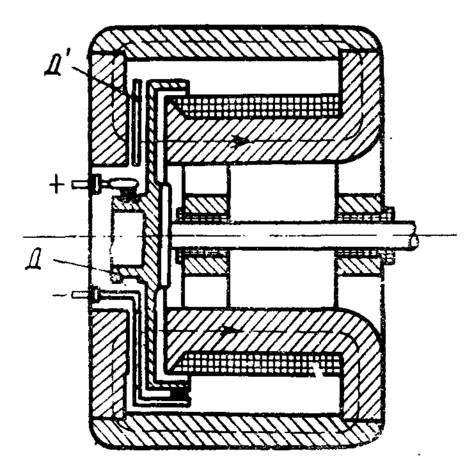



Рис. 14. Униполярная машина Тюри с компенсационным диском

рассмотренным дискам во взаимно противоположных направлениях. Подобный принцип «зеркального» отражения тока якоря применяется во всех конструкциях более поздних униполярных машин.

К описанным двум схемам дисковых машин вернемся при анализе машин с жидкометаллическим контактом. Здесь приведем только продольный разрез униполярного генератора Б. Угримова (рис. 15), который интересен тем, что дает представление о конструктивном оформлении машин с дисковым ротором более позднего времени (1909 г.). Для съема тока с окружности диска применен ртутный контакт. Второй контакт *К* осуществляется латунной щеткой со стального кольца, насаженного на вал. Диск ротора сделан из специальной стали, что позволило допустить линейную скорость на его окружности в 270 *м/сек*. Корпус статора (*S*) — стальное литье, *E* — поперечные сечения катушек возбуждения. Номинальные данные генератора: $P=80$ *квт*, $U=40$ *в*, $n=8000$ *об/мин*, к. п. д. при полной нагрузке 80%.

Существенным недостатком дисковых униполярных машин является чувствительность к неточностям сборки при монтаже. В случае появления магнитной асимметрии возникают значительные осевые усилия, затрудняющие работу подшипников и щеточного аппарата. Это повышает потери в машине и обусловливает значительные толчки ротора при изменениях тока. В связи с этим работы изобретателей были направлены на поиски более совершенной конструкции, хотя дисковые машины в отдельных случаях изготовляют до настоящего времени, например упомянутый во введении импульсный генератор Австралийского национального университета на пиковый ток в 1600 *ка*.

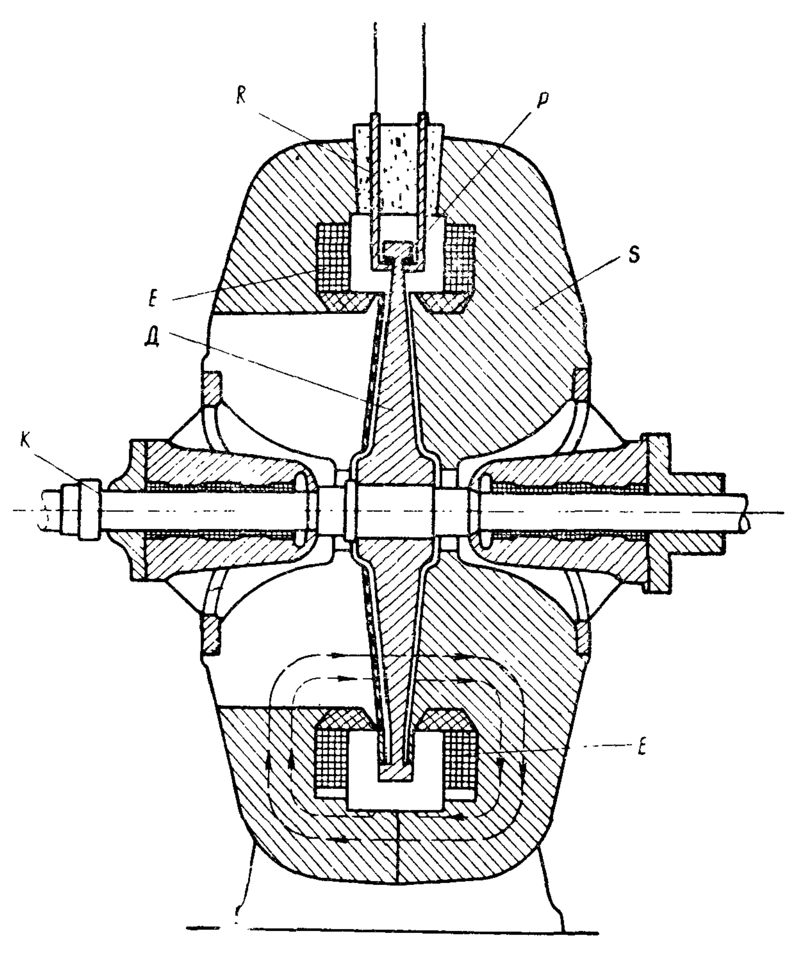



Рис. 15. Униполярный генератор Б. Угримова с дисковым ротором (Д) и ртутным контактом (Р)

## УНИПОЛЯРНЫЕ МАШИНЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РОТОРОМ

Идея создания униполярной машины с цилиндрическим ротором принадлежит также Форбсу. В конструкции своей машины (см. рис. 13) два вращающихся диска он решил заменить одним массивным цилиндром *I*. После ряда конструктивных поисков был построен генератор, разрез которого вдоль оси вращения дан на рис. 16.

Две катушки возбуждения (*E*), каждая из которых кольцом охватывает ротор, обтекаются током во взаимно противоположных направлениях. Магнитный поток радиально входит в сред-

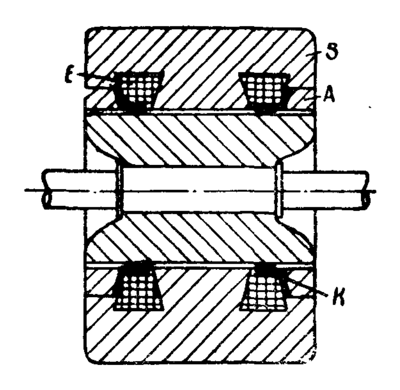



Рис. 16. Цилиндрическая униполярная машина Форбса

нюю часть ротора и, разделившись на две части, замыкается через боковые части статора ($S$). Таким образом, статор приобретает полярность: в средней части между катушками одну, по краям — противоположную. Токосъем осуществлялся по окружности ротора угольными щетками, которые вмонтированы в медные кольца $K$ углового сечения. Эти кольца соединены с обмотками возбуждения и торцевыми стальными кольцами ($A$), изолированными от статора.

Расчетные данные машины: скорость вращения ротора — 2000 *об/мин*, напряжение 2 *в*, ток 500 *а*. Габариты: длина 228,5 *мм*; наружный диаметр — 152,4 *мм*.

Следует отметить, что в униполярной машине с цилиндрическим ротором при помощи пары скользящих контактов удается использовать для получения напряжения только часть ротора. Так в рассмотренном случае щетки снимают э.д.с. ротора только в зоне между катушками возбуждения. Электродвижущие силы, индуктируемые в боковых частях ротора, имеют направление встречное э.д.с. средней части, поэтому для их использования потребовались бы дополнительные скользящие контакты.

В машине с цилиндрическим ротором в случае магнитной асимметрии возникают значительно меньшие осевые усилия, чем в машине с дисковым ротором.

Характерной особенностью униполярных машин любого типа является отсутствие при наличии круговой симметрии магнитного поля потерь от вихревых токов и на гистерезис в стали ротора. Это позволяет выполнять роторы униполярных машин массивными.

Отсутствие указанных потерь в стационарном режиме работы униполярного генератора объясняется тем, что напряженность магнитного поля в теле ротора, как это было отмечено в разделе I, не изменяется во времени. При исследовании потерь в генераторах, созданных по проектам Пуарсона и Сомеда, магнитные потери в стали практически отсутствовали [79]. Имевшие место небольшие магнитные потери в стали (менее 0,1 % от номинальной мощности) были обусловлены некоторой асимметрией системы и неоднородностью структуры материала ротора.

Максимальное напряжение, которое может быть снято парой скользящих контактов в униполярном генераторе с цилиндриче-

ским ротором, когда имеет место равномерное распределение магнитной индукции $B$ в воздушном зазоре, определяется простым выражением

$$e = Blv, \qquad (4)$$

где $l$ — активная длина цилиндра между двумя токосъемными устройствами;

$v$ — линейная окружная скорость цилиндра.

Принимая во внимание, что

$$v = 2\pi R n,$$

после подстановки в (4), получим

$$e = BS_{ц} n = \Phi n, \qquad (5)$$

где $S_{ц}$ — активная поверхность цилиндра;

$\Phi$ — магнитный поток, входящий в ротор.

Как отмечалось выше, магнитный поток $\Phi$ в роторе разделяется на две равные части, поэтому, заменяя мысленно цилиндрический ротор двумя дисками (наподобие схемы рис. 16), напряжение на щетках цилиндрической машины можно определить как сумму э.д.с., которые наводятся в этих двух «дисках»:

$$e = 2\Phi_{р} n, \qquad (6)$$

где $\Phi_{р}$ — поток в поперечном сечении ротора, как это следует из (3).

Полученный результат еще раз подчеркивает глубокую связь в смысле принципа действия между униполярными машинами с цилиндрическим и дисковым роторами.

## МАШИНЫ С РОТОРОМ В ВИДЕ КОЛОКОЛА

Массивный цилиндрический ротор может быть заменен полым цилиндром, имеющим форму колокола * (рис. 17). При сохранении активной длины, равной $l$, получается то же самое напряжение (см. формулу 4). В этом случае униполярная машина будет иметь малый механический момент инерции ротора.

Генератор с ротором в виде колокола был построен в 1888 г. по проекту Леру (см. рис. 17).

Одним из существенных недостатков рассматриваемого типа машин явились трудности, связанные с устранением механического «боя» колокола; обусловленного неизбежной магнитной асимметрией из-за неточностей при сборке генератора. Позже появились симметричные конструкции с продолжением активной стороны колокола в противоположную сторону, где помещались подобная магнитная система и катушка возбуждения (шведский патент Цендера и Юнгстрема, 1900 г). Примером унипо-

* Иногда применяют термин «барабанный» ротор.

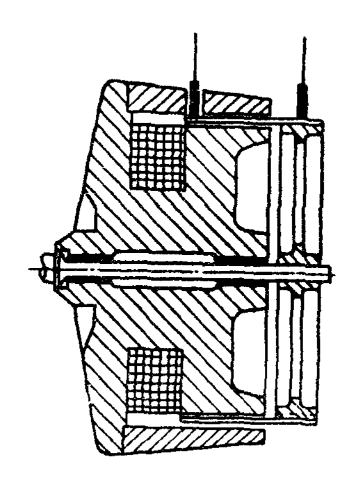


Рис. 17. Униполярный генератор Леру с колоколообразным ротором

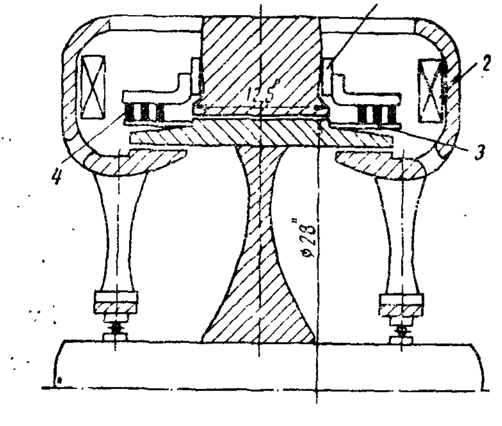



Рис. 18. Униполярный генератор мощностью 90 *квт* с Т-образным сечением ротора

*1* — токосъемное кольцо, *2* — обмотка возбуждения; *3* — контактное кольцо; *4* — щетки

лярной машины с симметричным ротором может служить генератор, построенный в 30-х годах двадцатого столетия со следующими номинальными данными: $P=90$ *квт*, $n=750$ *об/мин*, $U=6$ *в*, $I=15$ *ка*. Поперечный разрез генератора вдоль оси вала показан на рис. 18.

На обод массивного ротора диаметром 710 *мм* с двух сторон насажены в горячем состоянии бронзовые кольца (ширина каждого 152 *мм*), ток с которых снимался при помощи бракетов щеток. При этом средняя плотность тока под щетками составляла около 18 *а/см*$^2$ при удельном давлении 0,07 *кГ/см*$^2$. Две кольцевые обмотки возбуждения располагались вблизи боковых магнитопроводов. Ширина среднего сердечника составляла 318 *мм*, а воздушный зазор под ним был равен 1,5—2 *мм*. Вес машины достигал 11 *т*, что дает вес на единицу мощности 122 *кГ/квт*.

Целесообразно упомянуть генератор, у которого сплошной ротор в виде колокола был заменен «беличьей клеткой» (1899 г.). Компенсационная обмотка также была выполнена стержневой.

Машины с ротором в виде колокола не получили существенного развития. Однако в последние годы к ним снова вернулись [53], так как наряду с малой механической инерционностью ротора они позволяют осуществить конструкции с двумя вращающимися в противоположные стороны колоколами и, кроме того, применить удобные жидкометаллические токосъемники при вертикальном расположении оси вала ротора.

## УНИПОЛЯРНЫЕ МАШИНЫ С ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Униполярные машины, как было показано выше, являются низковольтными. В связи с этим термин «повышенное напряжение» является условным и характеризует машины, напряжение которых измеряется сотнями вольт.

Электродвижущая сила униполярной машины нормальной конструкции определяется скоростью вращения ротора и величиной полного магнитного потока. Механические нагрузки ротора, рост потерь в токосъемных устройствах, большие вес и габариты ограничивают возможности увеличения напряжения только за счет выбора предельных значений окружной скорости ротора и магнитного потока. В настоящее время, когда для современных униполярных машин достигнуты высокие технико-экономические показатели, широко применяется последовательное соединение нескольких генераторов (до 6 шт., как это показано на рис. 1).

Представляет интерес рассмотреть возможные способы повышения напряжения за счет конструкции самой машины. Соответствующие попытки были сделаны уже в ранних униполярных генераторах. На рис. 19 эскизно показан способ повышения напряжения за счет последовательного электрического соединения изолированных между собой коаксиальных цилиндров, образующих ротор. На этом рисунке показано два цилиндра (третьим является вал). Последовательное включение щеток осуществляется системой соединительных стержней.

Рассмотренный способ был положен в основу проекта Неггерата, по которому американской Всеобщей компанией электричества был построен в 1904 г. генератор мощностью 300 *квт*, напряжением 500 *в* при скорости вращения 3000 *об/мин* (рис. 20).

Цилиндрический якорь из литой стали охватывается стальным ярмом, выступы двух крайних кольцевых полюсов поддерживают катушки возбуждения *(E)*. Путь прохождения магнит-

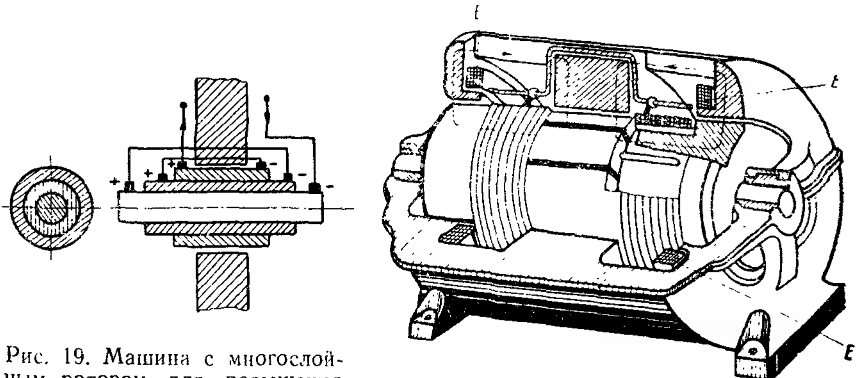



Рис. 19. Машина с многослойным ротором для повышения напряжения

Рис. 20. Униполярный генератор Неггерата

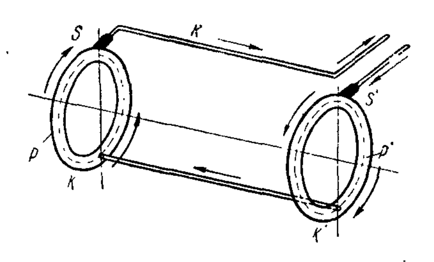



Рис. 21. Элементарный контур ротора машины Неггерата

ного потока показан прерывистой линией. По окружности якоря размещены двенадцать изолированных стержней, каждый из которых присоединен к своей паре изолированных стальных колец $P$, $P'$. С помощью пары щеток $S$, $S'$ и обратного проводника ($R$) образуется контур, который показан на рис. 21. При длине стержня ротора в 30 *см* ($KK'$) индуктируемая э. д. с. составляла 42 *в*. Система из двенадцати подобных контуров, соединенных последовательно, обеспечивала напряжение в 500 *в*.

Так как щетки разделяют кольца при вращении на две неравные изменяющиеся части между точками $S$ и $K$, то в кольцах появляются колебания тока, которые обусловливают возникновение дополнительных потерь в массивных частях машин. Для уменьшения потерь предусматривается сдвиг на постоянные углы как точек присоединения стержней к своим кольцам, так и щеток на кольцах [79]. Реакцию тока, протекающего по якорю и кольцам, в рассматриваемой машине удалось достаточно хорошо скомпенсировать. В результате величина посадки напряжения от реакции стала близкой к величине падения напряжения на сопротивлении.

Испытания униполярного генератора Неггерата показали, что потери локализуются главным образом на щетках. При этом для тока 1300 *а* падение напряжения под щетками составляло 0,82 *в*. Общие электрические потери были равны 28 *квт*.

Впоследствии упомянутой компанией были построены несколько униполярных генераторов подобной конструкции (например, генератор на 2000 *квт*, 600 *в* при 48 стержнях на роторе и 96 щетках). Усовершенствования коснулись главным образом способа вентиляции машин.

В последующие годы был изготовлен ряд униполярных генераторов с повышенным напряжением по проектам Ламме (1906 г.), Штейнметца (1907 г.), Томпсона (1907 г.), Барбура (1911 г.), авторы которых, однако, не внесли принципиально новых усовершенствований в конструкцию. Затем интерес к униполярным машинам в значительной мере пропал вплоть до 30-х годов двадцатого столетия.

## МАШИНЫ ПУАРСОНА И СОМЕДА

Стремление повысить напряжение униполярной машины со щетками конструктивными способами приводило, как это следует из приведенного выше анализа, к весьма сложным устройствам с относительно низким коэффициентом полезного действия.

Положительные качества униполярной машины (простота, надежность, низкая стоимость) проявляются в большей степени при низком напряжении, измеряемом десятками вольт. Поэтому сконструированный в 1930 г. Пуарсоном чрезвычайно простой низковольтный генератор на ток 15 *ка* дал новый толчок развитию униполярных машин.

На рис. 22 приведен эскиз такого генератора. Система щеток соединялась шинами с токосборными кольцами.

В 1937 г. на Международной выставке в Париже Пуарсон представил генератор уже на ток в 50 *ка*, развивающий напряжение 14 *в* при скорости вращения 750 *об/мин* [74] (рис. 23).

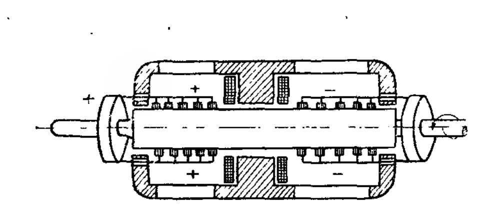


Рис 22. Униполярный генератор Пуарсона на ток 15 *ка*

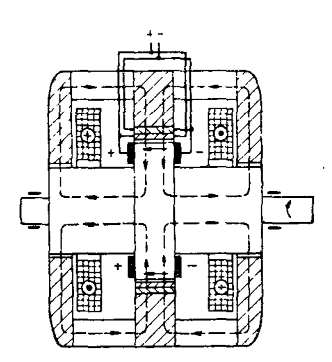


Рис. 23. Униполярный генератор Пуарсона на ток 50 *ка*

Для съема тока использовались по 200 шт. меднографитных щеток с каждой торцевой поверхности ротора. Такое размещение щеток обеспечивало равномерное растекание тока в роторе и снижало их механическую вибрацию. Плотность тока под щетками составляла 25 $а/см^2$. На статоре были размещены стальные компенсационные цилиндры, изолированные друг от друга и от статора. По каждому цилиндру от щеток одной полярности проходила половина тока якоря, что обеспечивало необходимую компенсацию его магнитного поля. Катушки возбуждения намотаны из медных полос и через реостат подключены к зажимам якоря, что обеспечивало протекание тока в 400 *а*.

Общие потери при испытании генератора составили 54 *квт*, им соответствует к.п.д. машины 92%. Распределение потерь в киловаттах: электрические (под щетками) — 30; от механического трения щеток — 14; трение в подшипниках и вентиляция — 7; возбуждение — 2,8; прочие — 0,2.

Из приведенных данных видно, что в униполярных машинах токосъем по-прежнему остается неразрешенной проблемой.

Наиболее удачным низковольтным генератором (7,2 *в* при 514 *об/мин*) с твердым контактом на большой ток (150 *ка*), ве-

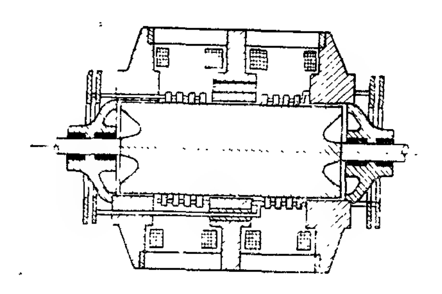


Рис 24. Продольный разрез униполярной машины Сомеда

роятно, был генератор, построенный в 1934 г. фирмой «Вестингауз» [45]. Он предназначался для контактной сварки стальных труб большого диаметра, допуская перегрузку по току до 270 *ка*. Токосъемные кольца охлаждались водой, которая подавалась через вал. Общая площадь скользящей поверхности щеток составляла 2 $м^2$.

Заслуживает внимания униполярная машина, построенная фирмой «Пеллицуари» (Италия) в 1941 г. по проекту Сомеда. Продольный разрез машины дан на рис. 24, а внешний вид — на рис. 25. При скорости вращения в 1000 *об/мин* она генерировала ток 15 *ка* при напряжении 6 *в*.

Компенсация реакции якоря, так же как в генераторе Пуарсона, осуществлялась при помощи двух стальных цилиндров.

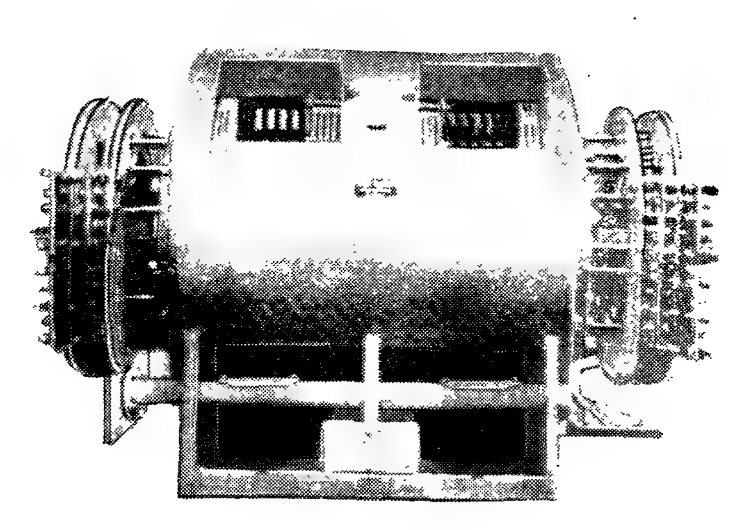


Рис 25 Внешний вид генератора Сомеда на 15 *ка*

Отличительной особенностью конструкции генератора Сомеда являлась подвижность этих цилиндров, установленных в воздушном зазоре машины с некоторым эксцентриситетом и связанных с поворотным устройством, которое было смонтировано на корпусе статора. Такая конструкция позволила одновременно осуществлять компенсацию магнитной асимметрии машины, которая неизбежно возникает из-за неточности сборки и неоднородности структуры материала магнитопровода.

Кроме того, на скользящей поверхности меднографитных щеток (общее их число 256 шт.) были нанесены в виде сетки канавки с шагом 8 *мм*. Опыты показали, что это дало некоторое снижение падения напряжения под щетками. Плотность тока в них была немного более 13 *а/см*².

Общие потери в машине — 25,4 *квт*, из них на токосъемное устройство приходится 22 *квт*. В результате к.п.д. машины при полной нагрузке составлял всего 78%.

## ПАРАМЕТРЫ И КОНСТРУКЦИЯ БОЛЕЕ ПОЗДНИХ УНИПОЛЯРНЫХ МАШИН

На рис. 26 дан общий вид статора и ротора высокоскоростного униполярного генератора на 3000 *об/мин*, 70 140 *в*, 9/4,5 *ка*, который был построен фирмой «Сименс-Шуккерт».

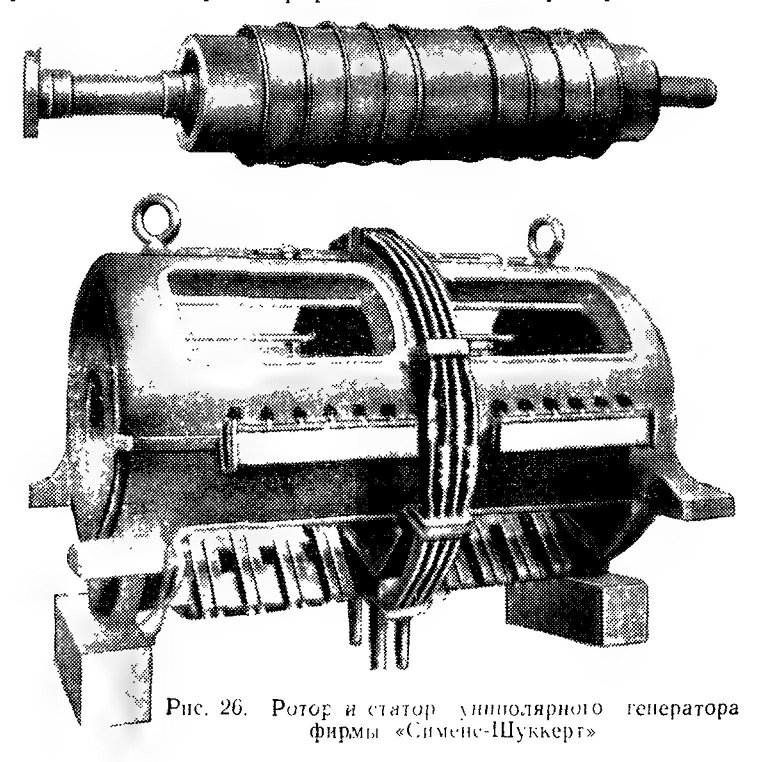


Рис. 26. Ротор и статор униполярного генератора фирмы «Сименс-Шуккерт»

На рис. 27 дана схема конструкции вертикального униполярного генератора, используемого для питания цепей синхроциклотрона [56,3]. В номинальном режиме генератор обеспечивает ток 21 *ка* при напряжении 18,7 *в*.

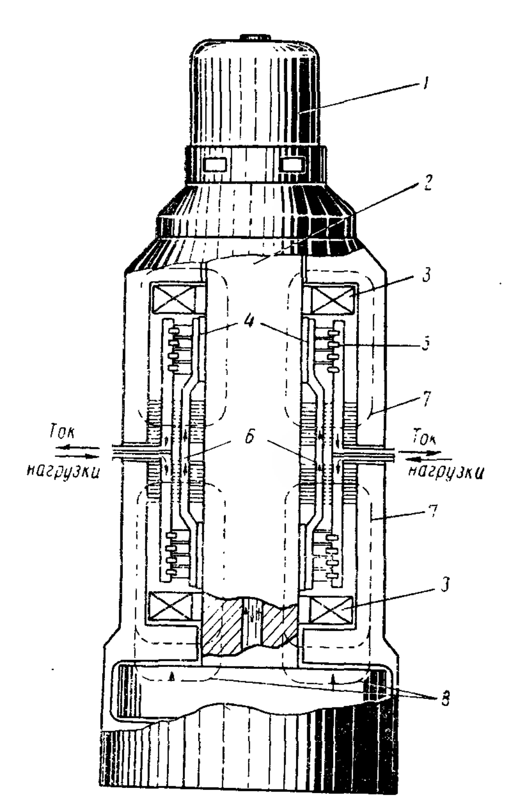



Рис. 27. Униполярный генератор с вертикальным цилиндрическим ротором

Оригинальна конструкция машины. Приводной двигатель *1* имеет мощность 400 *квт*. Массивный ротор *2* заканчивается внизу стальным кольцом *8*, которое притягивается магнитным потоком *7*, тем самым разгружая подшипники от нагрузки. Магнитные потоки *7* создаются кольцевыми обмотками возбуждения *3*. С целью компенсации реакции тока якоря стержни обмотки ротора *6* и стержни *5*, отводящие ток от щеток, расположены параллельно. В щетки запрессованы специальные трубки, по которым циркулирует охлаждающая их вода. Токосъемные кольца *4* также охлаждаются водой, которая поступает через аксиальное отверстие в вале.

Оригинальна конструкция униполярной машины с шариковым контактом (рис. 28). Ротор состоит из двух дисков* *1* и *2*, вращающихся во взаимно противоположных направлениях, с валами *3, 4*. Благодаря продолговатым пазам в дисках, составляющих с их радиусами углы от 45 до 90°, ток в якоре отклоняется от радиального направления. В результате этого

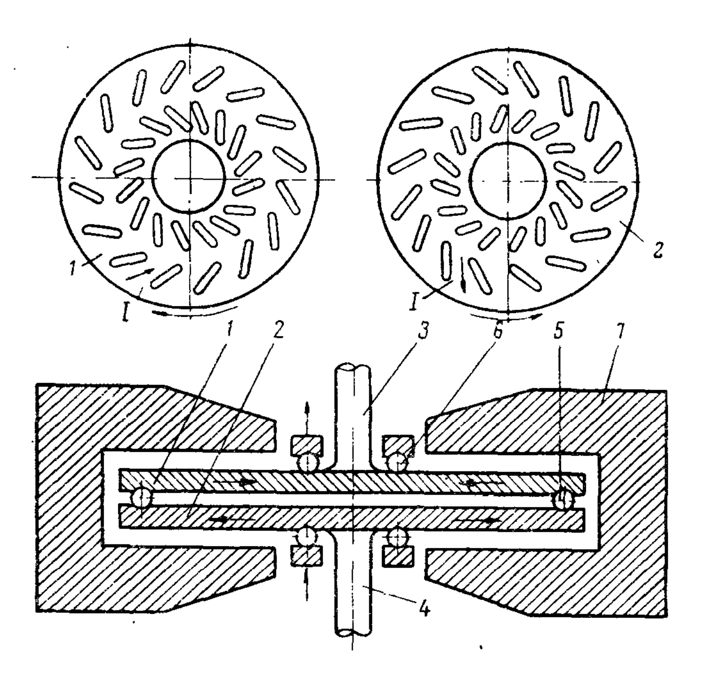



Рис. 28. Схема униполярной машины с шариковыми контактами

появляется направленное вдоль оси диска магнитное поле, которое используется для возбуждения машины. Поток замыкается по магнитопроводу *7*. Контакт между дисками осуществляется шариками *1, 5*, а с внешней цепью — шариками *6*. Индукция магнитного поля распределяется так, что в зоне контактных элементов качения оно практически отсутствует. Это важно с точки зрения уменьшения потерь на вихревые токи, которые возникают в шариках. Описанная машина имеет характеристики коллекторной машины постоянного тока с последовательным возбуждением.

---

* В общем случае дисков может быть больше двух.

## III. УНИПОЛЯРНЫЕ МАШИНЫ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ КОНТАКТОМ

Первая униполярная машина с жидкометаллическим (ртутным) контактом была создана в 1908 г. по проекту нашего соотечественника Б. И. Угримова. Продольный разрез машины см. на рис. 15, где схематически показано также токосъемное устройство *Р*. Во время вращения диска ртуть под действием центробежной силы затекает (вдавливается) в вырезы на его ободе, тем самым осуществляется контакт с четырьмя неподвижными ножами специальной формы. Ртуть в рабочую зону подается по каналам *R*. Кроме того, имеется система каналов для циркуляции охлаждающей воды. При номинальном напряжении 40 *в* расчетный ток якоря составлял 2000 *а*. Применение жидкометаллического контакта дало возможность выбрать для диска относительно высокую линейную окружную скорость, равную 270 *м/сек*.

Первые опыты эксплуатации описанного токосъемного устройства с ртутным контактом показали необходимость более углубленного исследования свойств жидкометаллических скользящих контактов. В первую очередь следовало:

1) обеспечить стабильную работу контакта с точки зрения постоянства его электрических свойств. Например, ртуть взаимодействует с металлом контактных колец (процесс амальгамирования), в результате чего со временем сильно ухудшается электропроводность контактной зоны;

2) разработать методику расчета потерь механического трения в жидкометаллическом скользящем контакте, что позволило бы правильно выбрать оптимальные размеры контактной зоны по условию обеспечения минимальных потерь.

Исследования по гидродинамике ртутного контакта впервые были начаты профессором Б. И. Угримовым в 1906—1908 гг. Позднее (1951—1954 гг.) глубокое исследование в указанном направлении было проведено Ю. Каунасом (СССР). Полученные теоретические результаты им были подтверждены опытными данными, снятыми на лабораторной модели униполярного генератора с ртутным скользящим контактом. Кроме того, Ю. Каунас дал анализ оптимальных геометрических размеров и основных параметров униполярных машин с жидкометаллическим ртутным контактом в зависимости от принятого диаметра ротора [61]. К сожалению, эта важная работа у нас не была доведена до создания промышленных образцов униполярных машин.

За рубежом одной из первых униполярных машин с ртутным скользящим контактом, которая получила практическое применение для питания электромагнитных насосов, был генератор на 10 *квт* и ток до 16 *ка*. Он был создан в Англии по проекту Д. Ватта [89, 90, 91]. Коэффициент полезного действия генератора составил 90%. Интересно отметить, что с целью уменьшения

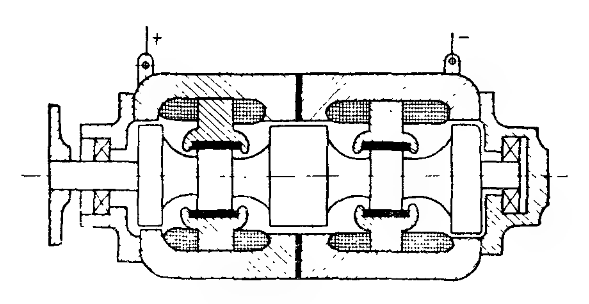



Рис. 29. Продольный разрез установки для исследования жидкометаллического контакта

размеров магнитопровод выполнен из материала с высокой магнитной проницаемостью — пермендюра, имеющего индукцию насыщения 2,4 *вб/м²*.

В последнее время существенные экспериментальные исследования по униполярным машинам с ртутным контактом проводятся под руководством П. Клауди [64] в Высшей технической школе г. Граца (Австрия). В результате создан униполярный генератор оригинальной конструкции, которая будет рассмотрена ниже. Ведутся интересные разработки так называемого струйного контакта, когда электрический контакт с вращающимся ротором создается с помощью направленных на него струй ртути.

Качественный скачок в развитии униполярных машин связан с применением для контактной жидкости новых сплавов и в первую очередь эвтектического сплава натрия с калием *. Свойства этого сплава будут рассмотрены ниже, здесь же только отметим, что при хорошей электропроводности он имеет сравнительно низкую для металла удельную плотность (на 15% ниже воды). Это значительно снижает механические потери трения в контактах токосъемных устройств. Сплав NaK обладает высокой теплоемкостью, поэтому может быть одновременно использован как охлаждающий агент, если предусмотреть его циркуляцию в активной зоне токосъемного устройства.

Первое использование NaK для униполярных машин относится к 1952 г., когда Л. Барнс предложил униполярный генератор с полностью погруженным в натрий-калиевый сплав ротором [47].

В 1953 г. были впервые опубликованы результаты работы группы румынских инженеров, проведенной в Ясском политехническом институте [39], по использованию скользящего контакта с применением сплава NaK для токосъема. На рис. 29 показан

---

* В дальнейшем указанный сплав будет сокращенно обозначаться NaK.

продольный разрез экспериментальной установки. Жидкометаллический сплав подавался в кольцевой зазор между ротором и статором. Исследования проводились в направлении изучения работы контакта при высоких линейных скоростях (порядка 150 *м/сек*).

Согласно [47], в США уже к 1957 г. униполярные генераторы на большой ток с жидкометаллическим натрий-калиевым контактом были смонтированы на пяти установках. Первоначальные образцы при скорости вращения 3600 *об/мин* генерировали напряжение 75 *в* и допускали ток в 80 *ка*, однако после улучшений в конструкции токосъемного устройства и изоляции номинальные ток и напряжение были доведены до 120 *ка* и 70 *в*. Другие генераторы имели повышенную скорость вращения 7200 *об/мин* и обеспечивали напряжение 30 *в* при токе 60 *ка*. Автор проекта отмечает, что величину номинального тока можно еще повысить, однако, по его мнению, более целесообразно остановиться на некоторых оптимальных данных, а более высокие параметры при необходимости получать за счет соответствующего соединения цепей нескольких «типовых» униполярных генераторов.

В 1962 г. было сообщено [41] об успешном испытании в Австралийском национальном университете униполярного генератора со струйным натрий-калиевым контактом, который выдержал импульс тока в 1800 *ка*. Проект этого генератора был создан еще в 1956 г. [71].

Таким образом, применение в качестве контактной жидкости эвтектического сплава NaK позволило создать целый ряд промышленных униполярных машин для импульсных и стационарных режимов на весьма большие токи. Возможности токосъемных устройств с ртутью еще полностью не использованы, особенно это относится к струйному типу контакта.

## ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТАКТНЫХ СРЕД

Под термином «контактная среда» мы будем понимать жидкие среды, которые могут быть использованы в соответствующих конструкциях для съема тока с вращающихся тел.

Учитывая назначение, отметим, что непременным свойством контактных сред должна являться удовлетворительная электрическая проводимость. Следовательно, в качестве контактной среды могут быть использованы только те металлы и их сплавы, которые при рабочей температуре (порядка 200° С) находятся в жидком состоянии.

В табл. 1 приведены металлы с относительно невысокой температурой плавления (менее 420° С) [35, 31]; в табл. 2 даны некоторые сплавы, у которых температура плавления ниже температуры плавления входящих в сплав компонентов [75].

Таблица 1

| Металл | Температура, °C | | Плотность при 17—23 °C, $г/см^3$ | Электрическое сопротивление при температуре, °C | |
|---|---|---|---|---|---|
| | плавления | кипения | | ($\rho\times10^{-8}$), $ом\cdot м$ | $t$, °C |
| Ртуть | —38,9 | 356,6 | 14,19 | 95,77 | 8 |
| Цезий | 30 | 690 | 1,87 | 20 | 20 |
| Галлий | 30 | 2100 | 5,93 | 27 | 30 |
| Рубидий | 38,7 | 679 | 1,53 | 19,6 | 40 |
| Калий | 62,5 | 760 | 0,86 | 13,0 | 62,3 |
| Натрий | 97,5 | 883 | 0,97 | 9,7 | 100 |
| Индий | 156 | 2100 | 7,28 | 29 | 155 |
| Литий | 186 | 1360 | 0,534 | 45 | 230 |
| Селен (аморфный) * | 220 | 690 | 4,8 | 12 | 20 |
| Олово | 231 | 2337 | 7,3 | 49 | 300 |
| Висмут | 271 | 1470 | 9,78 | 120 | 101 |
| Таллий | 302 | 1460 | 11,86 | 74 | 303 |
| Кадмий | 320,9 | 772 | 8,65 | 7,5 | 20 |
| Свинец | 327,3 | 1750 | 11,34 | 98 | 400 |
| Цинк | 419,5 | 908 | 7,1 | 37 | 440 |

* Металлоид.

В табл. 1 и 2 приведены также удельные электрические сопротивления при определенных температурах. Если учесть, что электрическое сопротивление мягкой стали при 20° С равно $15\cdot10^{-8}$ *ом·м*, то можно отметить, что ртуть и указанные сплавы являются относительно хорошими проводниками. Например, удельные сопротивления ртути и NaK соответственно только в 6,38 и 3,34 раза превосходят сопротивление стали. Несколько большие значения получаются при сравнении с медью, удельное сопротивление которой равно $1{,}72\cdot10^{-8}$ *ом·м*.

Отметим, что удельное электрическое сопротивление сплава NaK мало зависит от состава компонентов. Сопротивление с увеличением температуры сплава заметно возрастает (см. табл. 3).

Для успешной работы токосъемного устройства необходимо, чтобы контактная среда удовлетворяла ряду требований, основными из которых являются:

стабильность физико-химических свойств;

относительно низкая температура плавления и повышенная температура кипения;

низкая удельная плотность и вязкость;

хорошее смачивание контактной поверхности;

высокие удельная теплоемкость и теплопроводность;

повышенная удельная электрическая проводимость;

низкое переходное сопротивление между жидкой средой и металлической поверхностью контактных колец;

отсутствие токсичности паров жидкости.

Смысл указанных требований в основном сводится к обеспечению малых механических и электрических потерь, стабильности работы контакта и возможности эффективного его охлаждения.

Таблица 2

| Сплав | Состав сплава, % | Температура плавления, °C | Удельная плотность, $кг/м^3$ | Удельное электрическое сопротивление при 20 °C, *ом·м* |
|---|---|---|---|---|
| Натрий | 22,7 | −12,5 | 870 | $50 \cdot 10^{-8}$ |
| Калий (эвтектика) | 77,3 | | | |
| Натрий | 50 | −10 | 900 | $50 \cdot 10^{-8}$ |
| Калий | 50 | | | |
| Олово | 8,3 | 47 | 9100 | $160 \cdot 10^{-8}$ |
| Висмут | 44,7 | | | |
| Свинец | 22,6 | | | |
| Кадмий | 5,3 | | | |
| Индий | 19,1 | | | |
| Олово | 13,1 | 70 | — | — |
| Висмут | 49,5 | | | |
| Свинец | 27,3 | | | |
| Кадмий (эвтектика) | 10,1 | | | |
| Индий | 33 | — | 10 600 | $35 \cdot 10^{-8}$ |
| Ртуть | 66 | | | |
| Индий | 50 | — | 9450 | $28 \cdot 10^{-8}$ |
| Ртуть | 50 | | | |
| Сплав Вуда | — | 65 | 10 000 | — |

Примечание. Температура кипения сплава NaK (эвтектика) 760° С.

Таблица 3

**Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры [6]**

| Сплав | Состав сплава, % | Удельное электрическое сопротивление, *ом·м*, при температуре, °С | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 400 | 600 |
| Натрий . . . . .<br>Калий . . . . . | 28<br>72 | $50\cdot10^{-6}$ | $66\cdot10^{-6}$ | $82\cdot10^{-6}$ |
| Натрий . . . . .<br>Калий . . . . . | 44<br>56 | $50\cdot10^{-6}$ | $61{,}7\cdot10^{-6}$ | $78\cdot10^{-6}$ |

В настоящее время еще не найдена такая контактная среда, которая удовлетворяла бы одновременно всем приведенным условиям. Для токосъемных устройств униполярных машин практическое применение получили только ртуть и сплав натрия с калием, поэтому целесообразно сопоставить некоторые данные именно этих контактных сред.

Удельное сопротивление сплава NaK в 1,9 раза меньше, чем ртути.

Удельная плотность сплава NaK примерно в 16 раз меньше плотности ртути, что позволяет снизить потери механического трения жидкости пропорционально соотношению удельных плотностей (при прочих одинаковых условиях).

Следует отметить, что весьма низкую удельную плотность имеют также такие металлы, как литий, цезий и рубидий.

Уменьшению потерь механического трения способствует (правда, значительно в меньшей мере, чем величина плотности) низкое значение кинематической вязкости $\nu$, которая определяется отношением вязкости к удельной плотности. В табл. 4 приведены, в зависимости от температуры, соответствующие данные для ртути, а в табл. 5 – для сплава NaK [21]. Здесь же даны удельная теплоемкость $C$ и коэффициент теплопроводности $\lambda$. При температуре 100° С вязкость сплава NaK в 2,36 раза меньше, чем у ртути (соответственно $51{,}7\cdot10^{-5}$ и $122\cdot10^{-5}$ *н·сек/м*$^2$); однако величина кинематической вязкости сплава в 6,64 раза больше, чем для ртути (соответственно $60{,}7\cdot10^{-8}$ и $9{,}15\cdot10^{-8}$ *м*$^2$*/сек*). Последнее объясняется высокой удельной плотностью ртути ($\gamma$).

В разделе V будет показано, что механические потери в контактном устройстве пропорциональны величине $\gamma\cdot\nu^{0,182}$. Если произвести соответствующие расчеты с учетом указанных выше количественных соотношений, то получим, что потери в случае

применения сплава NaK будут в 10,5 раза меньше, чем при использовании ртути.

Таблица 4

**Параметры ртути**

| Температура, °C | Удельная плотность, $кг/м^3$ | Вязкость, $\frac{н \cdot сек}{м^2}$ | Кинематическая вязкость, $м^2/сек$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 13590 | $169 \cdot 10^{-5}$ | $12,42 \cdot 10^{-8}$ |
| 20 | 13550 | $157 \cdot 10^{-5}$ | $11,60 \cdot 10^{-8}$ |
| 50 | 13470 | $141 \cdot 10^{-5}$ | $10,47 \cdot 10^{-8}$ |
| 100 | 13350 | $122 \cdot 10^{-5}$ | $9,15 \cdot 10^{-8}$ |
| 150 | 13230 | — | — |
| 200 | 13110 | — | — |

Примечание. 1 $н \cdot сек/м^2$ = 10 *пз*

Таблица 5

**Параметры сплава NaK (натрий 25%, калий 75%)**

| $t$, *град* | $\gamma$, $кг/м^3$ | $\nu \cdot 10^8$, $м^2/сек$ | $C$, $\frac{ккал}{кг \cdot град}$ | $\lambda$, $\frac{кал}{м \cdot ч \cdot град}$ |
|---|---|---|---|---|
| 20 | 872 | 93 | 0,310 | 19,0 |
| 50 | 865 | 78,5 | 0,294 | 19,5 |
| 100 | 852 | 60,7 | 0,273 | 20,0 |
| 150 | 840 | 51,7 | 0,260 | 20,5 |
| 200 | 828 | 45,2 | 0,256 | 21,1 |
| 250 | 815 | 40,3 | 0,252 | 21,6 |
| 300 | 803 | 36,6 | 0,248 | 22,2 |
| 400 | 778 | 30,8 | 0,240 | 23,3 |
| 500 | 753 | 26,7 | 0,231 | 24,4 |
| 600 | 729 | 23,7 | 0,223 | 25,5 |

Примечание. 1 *ккал*=4,187 *дж*; 1 *ккал/ч*=1,163 *вт*.

Необходимо отметить высокие значения удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности для сплава NaK по сравнению с ртутью. Например, при 20° С для NaK $C=0{,}310$ *ккал/кг · град*, а для ртути только 0,0333 *ккал/кг · град*; соответственно для NaK $\lambda = 22{,}1$ *вт/м · град*, а для ртути 8 *вт/м · град*. Правда, если учесть большую удельную плотность ртути, то для одинаковых расходов жидкости при циркуляции сравниваемых контактных сред получим, что относительная способность отвода тепла у ртути будет выше. Эту способность можно оценить следующим отношением:

$$\frac{(\gamma C)_{Hg}}{(\gamma C)_{NaK}} = \frac{13550 \cdot 0{,}0333}{872 \cdot 0{,}310} = 1{,}67.$$

Данные по сплаву NaK с несколько отличным от рассмотренного выше составом компонентов, а именно 44% Na и 56% K, приведены ниже. Они взяты из [47]. Сплав указанного состава используется в униполярных генераторах, построенных фирмой Allis Chalmers.

**Свойства сплава NaK**

| | |
|---|---|
| Плотность при 100° С, *кг/м³* . . . . . . . . . | 887 |
| Температура плавления, ° С . . . . . . . . . . | —7 |
| Температура кипения, ° С . . . . . . . . . . . | 784 |
| Электрическое сопротивление при 100° С, *ом · м* . | $41{,}61 \cdot 10^{-8}$ |
| Теплоемкость, *ккал/кг · град* . . . . . . . . . | 0,269 |
| Вязкость, *н · сек/м²* . . . . . . . . . . . . . . | $54{,}6 \cdot 10^{-5}$ |
| Теплопроводность, *вт/м · град* . . . . . . . . | 24,9 |

Если принять константы NaK за единицу, то для соответствующих констант ртути приводятся следующие относительные значения: удельная плотность — 21; вязкость — 2,6; удельное электрическое сопротивление — 2,5; удельная теплоемкость — 0,143.

При выборе контактной среды следует иметь в виду ее химическую активность по отношению к окружающей среде. С этой точки зрения NaK имеет существенный недостаток — активно взаимодействует с кислородом воздуха и парами влаги. Применение активных контактных сред связано с необходимостью герметизации машины и заполнения ее внутренней полости соответствующим неактивным газом. В случае использования сплава NaK одним из таких газов является сухой азот. За счет небольшого избыточного внутреннего давления газа над атмосферным давлением устраняется «подсасывание» воздуха в машину снаружи.

Из рассмотренных выше свойств контактных сред ртути и сплава NaK можно сделать следующие заключения относительно областей их применения.

Для токосъемных устройств с высокими линейными скоростями контактной поверхности (до 200 *м/сек*) бесспорны преимущества сплава NaK. Зарубежный опыт эксплуатации позволяет заключить о достаточной стабильности работы подобных токосъемных устройств.

Ртуть целесообразно применять в токосъемных устройствах со скользящим контактом при относительно невысоких линейных скоростях контактной поверхности (примерно до 50 *м/сек*). В токосъемном устройстве со струйным контактом ртуть может быть использована для значительно больших линейных скоростей, так как в этом случае механические потери значительно уменьшаются.

## ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

Для съема тока с поверхности вращающегося тела при помощи жидкометаллической среды можно выделить два принципиально отличных способа:

1) среда полностью заполняет кольцевой канал между контактными поверхностями;

2) контакт осуществляется в отдельных местах поверхности по окружности тела за счет истечения под давлением тонких струй жидкости.

Достоинством первого способа является равномерность съема тока по окружности контактного кольца и, как следствие, обеспечение равномерного растекания тока в теле ротора. При небольших плотностях тока в контакте, когда можно отказаться от принудительной циркуляции контактной среды в канале с целью охлаждения, указанный токосъем позволяет создать относительно простые конструкции. Недостатком этого способа являются повышенные потери механического трения жидкости, что затрудняет применение кольцевых контактов в случаях высоких линейных скоростей контактной поверхности и жидкометаллических сред с большой удельной плотностью.

Достоинством второго способа является возможность существенного снижения потерь трения жидкости, однако в этом случае имеет место неравномерное распределение тока по окружности контактного кольца, а следовательно, и в теле ротора. Неравномерность распределения тока обусловливает дополнительные электрические потери. Для создания струй жидкости необходимо вспомогательное регулируемое устройство Тем не менее именно струевой тип контакта должен расширить область применения ртути в униполярных машинах, несмотря на ее большую удельную плотность. Испытания показали [64], что благодаря низким механическим потерям и хорошей охлаж-

дающей способности ртути контакт хорошо сохраняется. Для линейной скорости контактной поверхности 150 *м/сек* и тока 1 *ка* оказывается возможным при механических потерях в струе около 750 *вт* получить электрическое сопротивление контакта менее чем $10^{-3}$ *ом*.

Остановимся на некоторых принципиальных схемах контактных устройств рассмотренных выше двух типов.

Оригинальная конструкция кольцевого контакта для машины с горизонтальной осью вращения показана на рис. 30 [15].

При вращении внутреннего кольца *3*, насаженного на цилиндр *4*, ртуть под действием центробежной силы удерживается в рабочем положении *1*, что обеспечивает контакт с наружным кольцом *2*. При неподвижном внутреннем кольце ртуть сливается по его двум желобам, которые хорошо видны на приведенном рисунке.

Определение оптимального зазора $\Delta_к$ между контактными кольцами из условия получения минимальных механических потерь трения может быть произведено по формуле *

$$\Delta_к = 0,16 \frac{D_к}{Re^{0,182}},$$

где $D_к$ — диаметр контактного кольца;

Re — число Рейнольдса (см. раздел V).

На рис. 31 дано устройство, которое отличается тем, что вращающееся токосъемное кольцо ротора расположено с внешней стороны жидкости. Внутреннее кольцо выполнено в виде стакана.

Поперечный разрез кольцевого контактного устройства машины с вертикальной осью вращения приведен на рис. 32. На рисунке видны каналы для подачи и отвода жидкометалличе-

* В формулу введена коррекция по результатам опыта

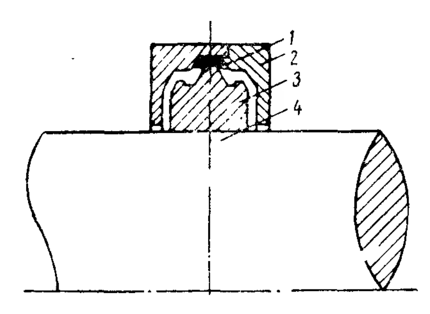



Рис. 30. Поперечный разрез кольцевого токосъемного устройства

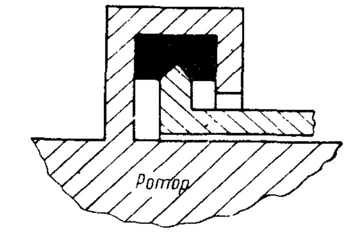
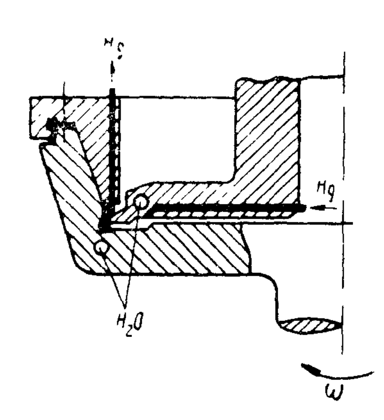



Рис. 31. Поперечный разрез токосъемного устройства с внешним вращающимся кольцом



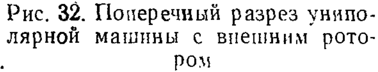



Рис. 32. Поперечный разрез униполярной машины с внешним ротором

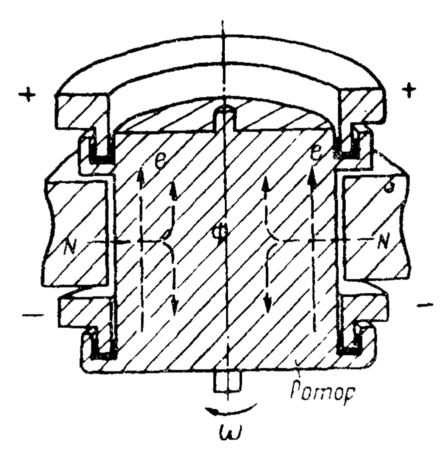



Рис. 33. Токосъемные устройства в униполярной машине с вертикальной осью вращения

ской среды, а также два отверстия в роторе и статоре, которые являются поперечными сечениями каналов водяного охлаждения.

На рис. 33 и 34 даны две схемы контактного устройства машины с вертикальной осью. В первом случае ротор цилиндрического типа, во втором — колоколообразного.

В конструкции на рис. 34 предполагается соответствующим подбором линейной скорости контактного кольца обеспечить при вращении ротора равновесие центробежной, гравитационной и электромагнитных сил. Под их действием жидкометаллическая «щетка» будет находиться в фиксированном положении.

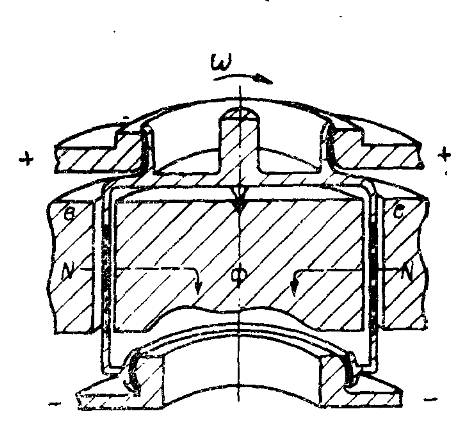



Рис. 34. Поперечный разрез униполярной машины с кольцевыми контактами

Сведения по конструкции и размерам токосъемных устройств со струевым контактом в опубликованной литературе крайне недостаточны — можно найти только два поясняющих эскиза, которые приведены на рис. 35 и 36 [64, 83].

Жидкость под давлением выталкивается из отверстий (или щелей) на движущуюся поверхность, в результате воздушный зазор между токосъемными кольцами в зоне форсунок оказывается хорошо заполненным жидкометаллической средой.

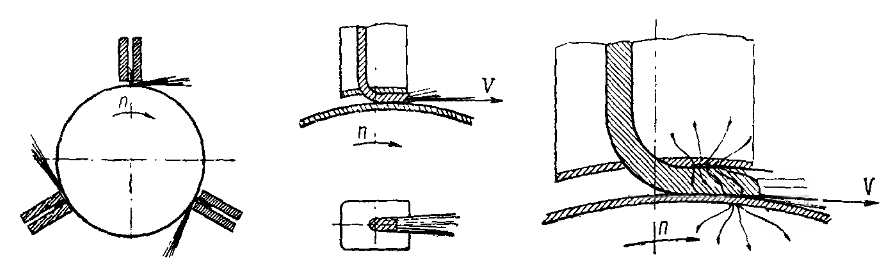



Рис. 35. Эскиз струевого токосъемного устройства

Представляет интерес сообщение о характере работы струевого контакта на ток в 1600 *ка* импульсного униполярного генератора Австралийского национального университета [41].

Токосъем осуществляется струями сплава NaK на окружностях диаметрами 1,22 и 3,54 *м*. Жидкость имеет высокую скорость истечения. Ток через данную струю проходит всего 0,001 *сек*, поэтому она не успевает сильно нагреться. За время импульса в 1 *сек*, через все форсунки выбрасывается более 1 *т* жидкого сплава. Если учесть, что скорость вращения ротора равна 900 *об/мин*, то нетрудно рассчитать линейные скорости диска в зонах контактов — они составляют соответственно 57,4 и 166,5 *м/сек*. При испытании генератора в импульсном режиме струевой контакт удовлетворительно выдержал всплеск тока в 1800 *ка*.

По данным [52, 53], ртутный контакт тоже обладает удовлетворительной стабильностью переходного сопротивления при больших кратковременных перегрузках по току.

Достаточно точное определение механических потерь трения в контактном устройстве желательно как с точки зрения анализа его температурного режима, так и оценки коэффициента полезного действия машины. С теоретических позиций этот вопрос для кольцевого контакта подробно рассмотрен в разделе IV, здесь остановимся только на некоторых результатах экспериментального исследования механических потерь [64].

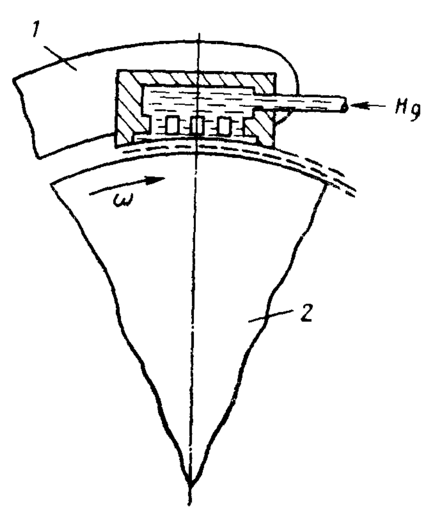



Рис. 36. Эскиз струевого токосъемного устройства

*1* — статор; *2* — ротор

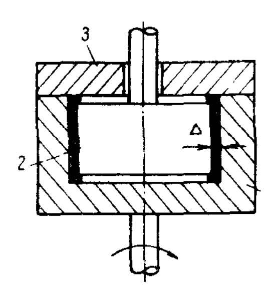



Рис. 37. Устройство для определения механических потерь трения жидкости

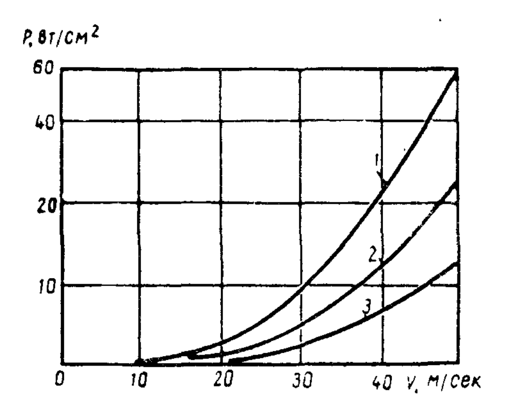



Рис. 38. Зависимость удельных потерь трения ртути от линейной скорости поверхности и толщины слоя жидкости

*1* — $\Delta$=0,4 *мм*; *2* — $\Delta$=1,7 *мм*; *3* — $\Delta$=4,5 *мм*

На рис. 37 дана схема испытательного устройства. Внутри цилиндрического сосуда *1* помещено неподвижное цилиндрическое тело *2* так, что между ними образуется зазор $\Delta$. При вращении сосуда исследуемая контактная среда, которая перед этим была введена в определенном количестве в сосуд, прикрытый крышкой *3*, благодаря действию центробежной силы заходит в зазор, как это имеет место в кольцевом зазоре униполярной машины. Потери от трения жидкости находятся после вычитания потерь механического трения устройства, которые предварительно определяются при отсутствии жидкой среды. Вариации подлежат скорость вращения сосуда, диаметр и высота внутреннего тела, тем самым изменяются величина зазора $\Delta$ и поверхность покрытия жидкостью цилиндров. Измеренные таким образом механические потери трения для ртути отнесены к единице поверхности контакта и в зависимости от линейной скорости поверхности тела *1* нанесены на рис. 38. С помощью этих данных можно установить приближенную зависимость следующего вида:

$$P_{м} = Ksv^3,$$

где $s$ — покрытая жидкостью поверхность неподвижного цилиндра;

$K$ — постоянный коэффициент, зависящий от вязкости жидкости.

С увеличением вязкости жидкости коэффициент $K$ возрастет.

Перейдем к рассмотрению электрических потерь в контактном устройстве. Исследования показали, что электрическое сопротивление прохождению тока через контактную зону опреде-

ляется не столько сопротивлением самой жидкометаллической среды, сколько посторонними слоями, которые образуются на границах соприкосновения * жидкости с металлическими поверхностями токосъемных колец. Возникновение этих слоев обусловлено химическим взаимодействием жидкометаллической среды с материалом колец и окружающими газами, а также электролитическими процессами при прохождении тока. В связи с этим протекание электрического тока через контактную зону представляет собой как бы прохождение его через решето, отверстиями которого служат места пробоя пограничных контактных слоев.

Опыты показали, что сопротивление контактной зоны существенно снижается, если поверхность токосъемных колец периодически «царапать» специальными твердыми щетками, например алмазными или титан-карбидными.

Сильное снижение электрического сопротивления пограничного контакта оказывается возможным за счет соответственно подобранного тонкого покрытия твердой поверхности металлическими слоями.

Так, в случае применения ртути хороший результат дает покрытие никелем, а сверху родием (температура плавления никеля 1453° С, а родия — 700° С) [52, 53]. Правда, при этом могут возникнуть известные трудности в обеспечении целостности нанесенных слоев при работе контакта.

На рис. 39 даны [64] результаты опытных измерений сопротивления контакта между двумя цилиндрическими электродами

* В дальнейшем для обозначения отмеченного контакта будем употреблять термин «пограничный контакт».

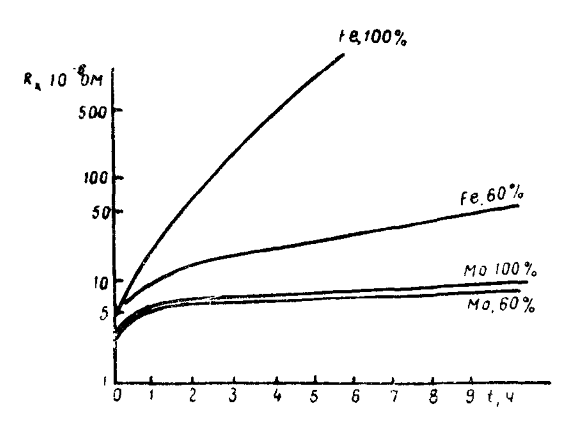



Рис. 39. Зависимость электрического сопротивления ртутного контакта от материала покрытия электродов и влажности воздуха

(диаметром 12 *мм*); пространство между торцами было заполнено ртутью. Число, поставленное около кривой, показывает процентную влажность воздуха в опытах. Там же отмечен материал покрытия.

По характеру кривых можно заключить, что уже после нескольких минут на чистой поверхности металла возникает пограничный слой, сопротивление которого быстро растет. Увеличение сопротивления для различных металлов происходит по-разному и в большинстве случаев достигает довольно определенных конечных значений. Хорошей стабильностью сопротивления обладает молибденовое покрытие. Подобно молибдену ведет себя никель, который благодаря небольшому сопротивлению пограничного контакта * с ртутью, по-видимому, особенно пригоден для использования в токосъемных устройствах.

Ртутно-никелевый контакт допускает относительно высокие плотности тока (порядка 50 $a/мм^2$), что позволяет наряду с уменьшением размеров токосъемного устройства существенно снизить механические потери трения жидкости.

В результате прохождения электрического тока через пограничные контактные слои возникают так называемые пограничные напряжения, которые пропорциональны поверхностной плотности проходящего тока и, как было показано, сильно зависят от химических свойств соприкасающихся элементов. Для характеристики величины пограничных напряжений удобно оперировать удельным пограничным напряжением $\varepsilon_к$, которое определяется отношением пограничного напряжения при прохождении через контакт тока к соответствующей его поверхностной плотности. Таким образом, размерность $\varepsilon_к$ будет выражаться в $вм^2/а$.

Удельное пограничное напряжение определяют экспериментально; соответствующие данные приведены в табл. 6 и 7.

* Удельное электрическое сопротивление чистого никеля — $7{,}24 \cdot 10^{-8}$ *ом · м*.

Таблица 6

**Удельные пограничные напряжения ($\varepsilon_к$) на пару местных контактов (по данным [39])**

| Контактная среда | $\varepsilon_к$, $вм^2 \cdot a$ — материал колец: сталь | медь |
|---|---|---|
| Ртуть . . . . . . . . | $(5{,}65 \div 9{,}5) \cdot 10^{-6}$ | $1{,}08 \cdot 10^{-9}$ |
| Сплав Na (30%)+K (70%) . . . . . . . | $(8{,}55 \div 11{,}4) \cdot 10^{-6}$ | $3{,}2 \cdot 10^{-9}$ |

Таблица 7

**Удельные пограничные напряжения ($\varepsilon_к$) на один местный контакт (по данным [75])**

| Контактная среда | Состав, % | $\varepsilon_к$, $вм^2/а$, материал колец: сталь | $\varepsilon_к$, $вм^2/а$, материал колец: медь |
|---|---|---|---|
| Ртуть | — | $0,1\cdot10^{-6}$ | $0,1\cdot10^{-9}$ |
| Натрий<br>Калий | 30<br>70 | $(1\div0,1)\cdot10^{-6}$ | $5\cdot10^{-9}$ |
| Ртуть<br>Индий | 66<br>33 | $0,01\cdot10^{-6}$ | $2,5\cdot10^{-9}$ |
| Ртуть<br>Индий | 50<br>50 | $0,01\cdot10^{-6}$ | — |
| Олово<br>Висмут<br>Свинец<br>Кадмий<br>Индий | 8,3<br>41,7<br>22,6<br>5,3<br>19,1 | $0,0025\cdot10^{-6}$ | — |
| Графитовые щетки | — | $27\cdot10^{-6}$ | $27\,000\cdot10^{-9}$ |

Из приведенных в таблицах данных следует, что контактное напряжение для меди на три порядка ниже, чем для стали. Поэтому с целью снижения потерь контактные кольца следует выполнять медными. В тех случаях, когда по условию механической прочности медные кольца не могут быть использованы на роторе, контактную поверхность колец необходимо покрыть слоем меди.

В случае использования ртути следует иметь в виду, что хотя она образует нестойкие окиси, но зато соединяется с многими металлами, теряя при этом чистоту и электрические свойства. Выше отмечалась целесообразность покрытия контактной поверхности соответствующими металлами. Кроме того, некоторые авторы считают желательным очистку ртути в циркуляционном контуре.

Обращает внимание расхождение у разных авторов опытных данных по удельным пограничным напряжениям для ртути и сплава NaK (см. табл. 7, 8). Это еще раз подтверждает существенное влияние таких трудно учитываемых факторов, как процесс окисления элементов, состояние поверхностей контактов

и т. д. Однако для представляющего в настоящее время наибольший интерес контакта NaK с медью можно констатировать лучше согласующиеся между собой величины.

## УНИПОЛЯРНЫЕ МАШИНЫ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ КОНТАКТОМ

В настоящем параграфе будут рассмотрены параметры и конструкции некоторых современных униполярных машин.

**Генератор Ватта.** На рис. 40 показан продольный разрез вдоль оси вала униполярного генератора конструкции Ватта

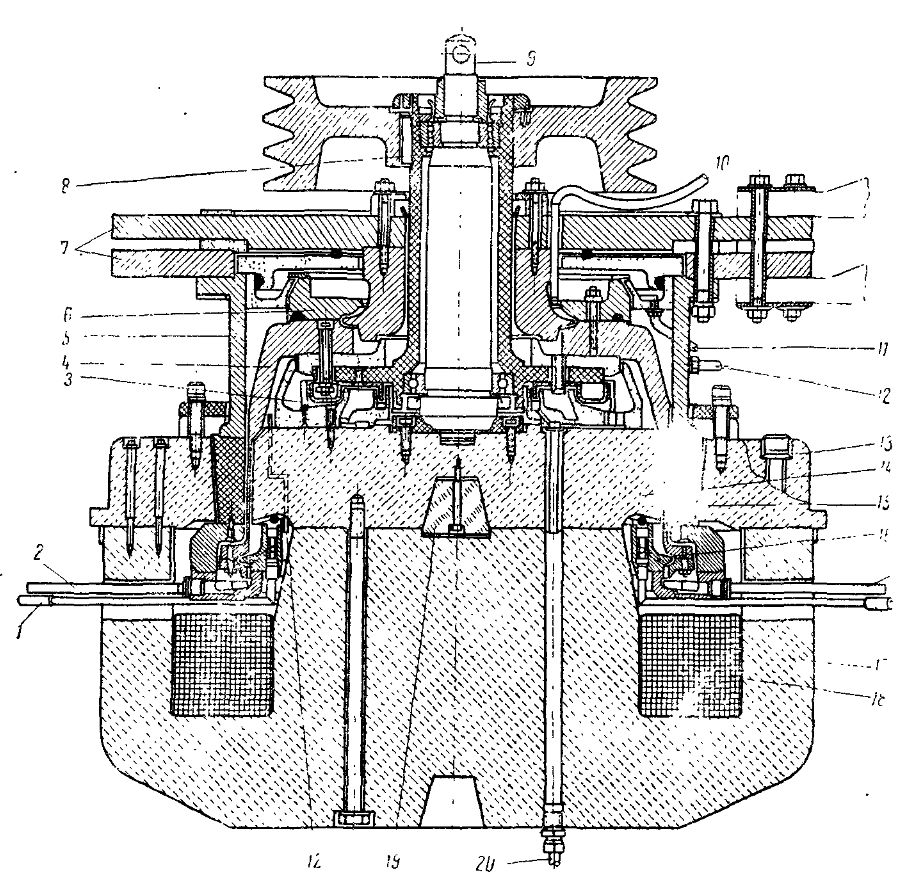



Рис 40. Продольный разрез униполярного генератора Ватта

*1* — трубка для подачи ртути в контактную зону; *2* — трубка для отвода ртути из контактной зоны; *3* — лабиринтное уплотнение; *4* — колоколообразный медный ротор, *5* — медный цилиндр для обратного тока; *6* — верхний кольцевой ртутный контакт, *7* — клеммные пластины; *8* — немагнитная приводная втулка; *9* — немагнитный центрирующий вал, *10* — трубка для подачи ртути в верхний кольцевой контакт; *11* — отводная трубка сборного коллектора; *12* — трубка для подачи азота; *13* — внешний стальной магнитопровод; *14* — внутренний стальной магнитопровод; *15* — компенсационный цилиндр из низкоуглеродистой стали; *16* — нижний кольцевой ртутный контакт; *17* — нижний стальной магнитопровод; *18* — обмотка возбуждения; *19* — центрирующий блок. *20* — отвод ртути от верхнего скользящего контакта

[89, 90, 91]. Генератор используется для питания электромагнитного насоса и имеет следующие номинальные данные: мощность 10 *квт*, ток 16 *ка*, напряжение 0,625 *в*, скорость вращения 780 *об/мин*, индукция в воздушном зазоре 0,8 *вб/м²*. Токосъем осуществляется ртутным контактом кольцевого типа. Определенный на основании опытов максимальный к.п.д. генератора составил 95%. Ротор — колоколообразный, из меди с диаметром 32 *см* и активной длиной 8 *см*. Он закреплен на немагнитной втулке с вертикальной осью вращения. Токоведущие шины расположены сверху, причем одна из них одновременно является крышкой. Внутренняя полость статора заполняется сухим азотом. Ток, пройдя ротор и нижний ртутный контакт, возвращается по цилиндру из стали с высокой магнитной проницаемостью, тем самым обеспечивается компенсация реакции якоря.

**Генератор Клауди.** На рис. 41 показан разрез вдоль оси вала униполярного генератора П. Клауди. На рис. 42 даны контуры циркуляции ртути, охлаждающей воды и смазочного масла, а также схематически показан привод генератора, который состоит из асинхронного двигателя *(Д)* и редуктора *(G)*, имеющего передаточное отношение 1 : 3.

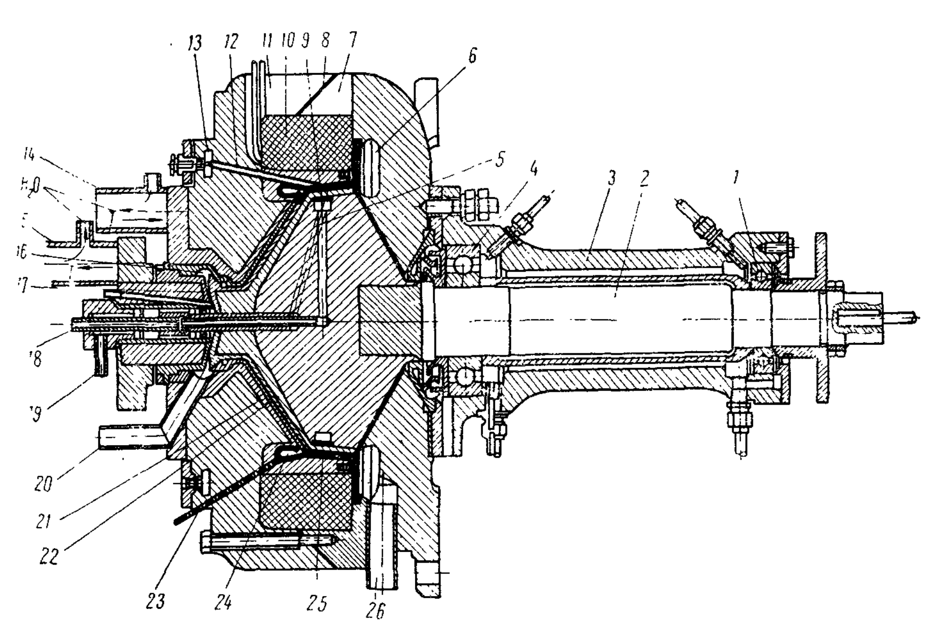



Рис. 41. Продольный разрез униполярного генератора Клауди

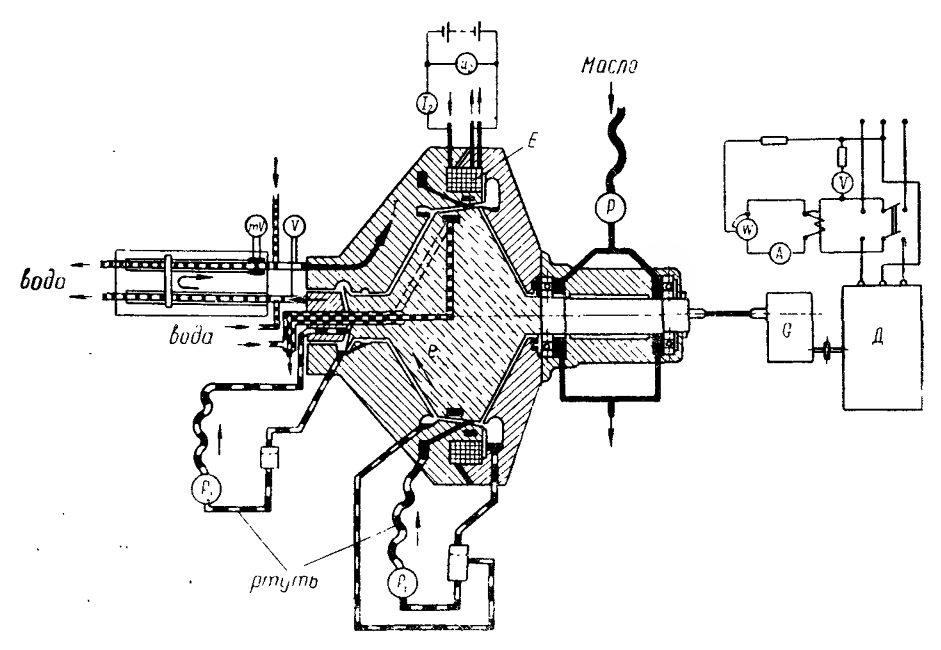



Рис. 42. Схема циркуляции ртути, воды, масла и направления электрического тока в генераторе Клауди

Номинальные данные униполярного генератора: мощность 20 *квт*, ток 20 *ка*, напряжение 10 *в*, скорость вращения 8800 *об/мин*.

Токосъем осуществляется струями ртути, линейная скорость контактной поверхности составляет 125 *м/сек*. Воздушный зазор между форсунками и вращающейся поверхностью 0,2—0,5 *мм*. Контактная поверхность покрыта слоем никеля. Обмотка возбуждения рассчитана на создание намагничивающей силы 17 *ка*.

Тело ротора *L* из стали ST-37 навинчено на вал *2* (рис. 41), который консольно удерживается двумя шариковыми подшипниками *1* и *4*, расположенными в трубе *3*. Корпус статора выполнен разъемным, обе части (*7* и *11*) изолированы друг от друга прессшпановой прокладкой *8*. Материал корпуса — котельная сталь марки STG-38Д.

Обмотка возбуждения *10* выполнена из 81 трубчатого провода (*ф* 7/5 *мм*) с двумя параллельными ветвями охлаждения. Намагничивающая сила обмотки создает магнитный поток, который проходит по двум частям корпуса статора (*7* и *11*), через два воздушных зазора, тело ротора, медный диск (вкладыш) *22* на роторе и компенсационное медное кольцо *21* на статоре.

Впоследствии материал диска и кольца был заменен на сталь, что позволило увеличить коэффициент полезного действия генератора до 82% (с учетом возбуждения и вспомогательных механизмов). Струевой жидкометаллический контакт соединяет диск и компенсационное кольцо на периферии и в торцевой части около вала. Ртуть нагнетается насосом $P_1$ (рис. 42) в кольцевой канал *13*, далее по осевому каналу *12* поступает в периферическую контактную зону, а затем собирается по кольцевым каналам *6* и *24*, имеющим внизу соответствующие отводящие трубы *26* и *23*.

В торцевую контактную зону ртуть нагнетается насосом $P_2$ через осевой канал *18* с выбросом ее в кольцевую выточку *16*, которая имеет отводящую трубу *20*.

Тело ротора и зона периферического контакта охлаждаются водой, которая подается по трубке *18* в центральную часть ротора и далее по радиальным каналам поступает в кольцевую выточку *9*, откуда через наклонный канал *5* и центральную осевую внешнюю трубку вода стекает по трубе *19*. Для охлаждения торцевого контакта вода подается через трубку *17*. Вода не должна содержать солей и ионов. Токоподводящие шины *14* и *15* выполнены в виде полых труб, по которым циркулирует вода.

**Машина Пулэна.** Принципиальная схема машины Пулэна приведена на рис. 43.

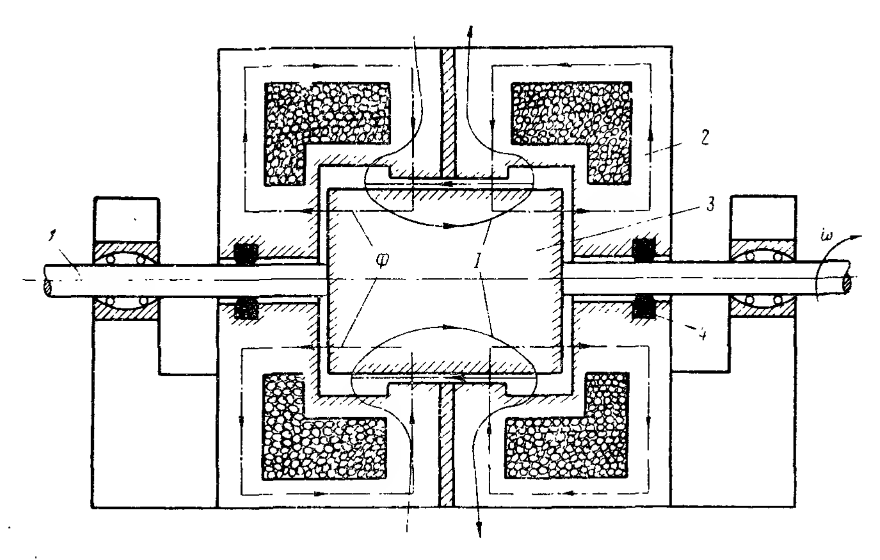



Рис. 43. Принципиальная схема униполярной машины Пулэна

На схеме показаны пути прохождения магнитного потока (пунктиром) и электрического тока (сплошная линия). Магнитопровод статора состоит из двух изолированных шайбой *1* частей. Ток проходит по стали ротора *3* и статора *2*, которые между собой соединяются с помощью жидкометаллического скользящего контакта. Жидкометаллическая среда поступает под действием центробежной силы из аксиального зазора в радиальный. Для ослабления магнитного поля в зоне контакта воздушный зазор в этой части между поверхностями статора и ротора несколько увеличен. С этой целью поперечному сечению катушки возбуждения придана сложная форма и предусмотрен магнитный шунт для замыкания силовых линий поля рассеяния основного магнитного потока. Для предотвращения вытекания жидкости предусмотрены уплотнения *4*.

Продольный разрез униполярной машины Пулэна показан на рис. 44.

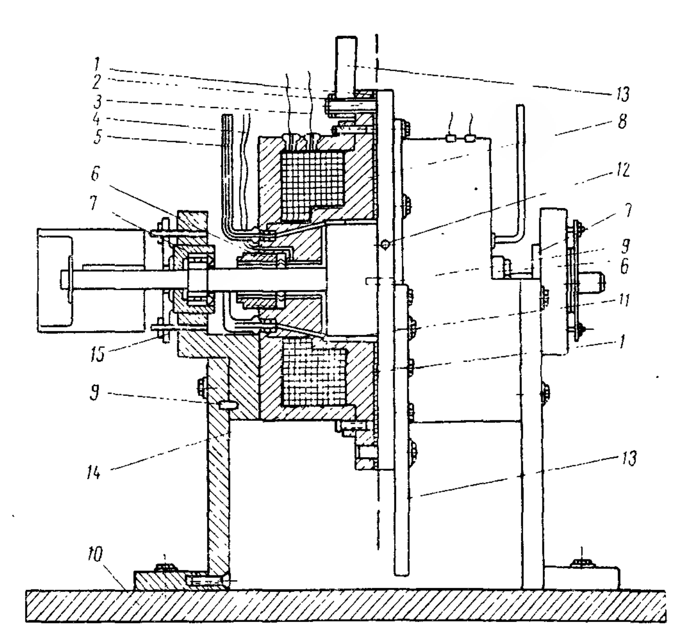



Рис. 44. *Продольный разрез униполярной машины Пулэна*

*1* — изоляционная шайба; *2* — изолирующая трубка для крепящих шинопровод болтов; *3* — выводные провода катушки возбуждения; *4* — шланги для подачи газа аргона за уплотнение вала; *5* — трубки для подачи контактной среды и инертного газа в зону контакта; *6* — кольцевое уплотнение; *7* — изоляционная втулка, удерживающая подшипник; *8* — магнитопровод (мягкая сталь); *9* — центрирующий штифт; *10* — изоляционное основание; *11* — жидкометаллическая контактная среда; *12* — зажимы напряжения; *13* — токовые шины; *14* — крышка магнитопровода; *15* — болт для регулирования аксиального зазора между ротором и статором

Основные размеры машины: диаметр ротора — 66 *мм*, его длина — 60 *мм*, воздушный зазор под полюсом — 0,5 *мм*. Общий вес машины — 30 *кг*.

Номинальный ток 3000 *а*, скорость вращения 3000—6000 *об/мин* (критическая скорость вращения достигает 18 000 *об/мин*). Электрическое сопротивление растеканию тока составляет для статора $2{,}6 \cdot 10^{-6}$ *ом*, а для ротора $1{,}4 \cdot 10^{-6}$ *ом*. Средняя плотность тока в роторе 80 *а/см*$^2$. Средняя индукция в воздушном зазоре — 1,5 *вб/м*$^2$, напряжение и ток обмотки возбуждения (при номинальном токе якоря) соответственно равны 120 *в* и 1,5 *а*.

Машина интересна тем, что токосъем в ней осуществлен с помощью сплава ртути и индия (50% Hg и 50% In), находящегося в атмосфере инертного газа — аргона. Зазор между поверхностями статора и ротора в зоне контакта составляет 1,5 *мм*. Для жидкометаллического контакта имеют место следующие характерные данные (на один токосъем):

линейная скорость контактной поверхности ротора при 6000 *об/мин* — 20,7 *м/сек*;

контактная поверхность ротора — 26 *см*$^2$;

объем жидкости в контактной зоне — 45 *см*$^3$ (38 *г*);

плотность тока в контакте (при 3000 *а*) — 115 *а/см*$^2$;

падение напряжения в контакте — $40 \cdot 10^{-3}$ *в*.

Результаты экспериментального исследования машины в генераторном режиме для двух скоростей вращения даны в **табл. 8**.

Таблица 8

| Измеряемые данные | Скорость вращения, *об/мин* | |
|---|---|---|
| | 6000 | 3000 |
| Отдаваемая мощность, *вт* | 2300 | 1000 |
| Напряжение на зажимах, *в* | 0,77 | 0,40 |
| Ток нагрузки, *а* | 3000 | 2500 |
| Механические потери, *вт* | 140 | 60 |
| Потери в стали, *вт* | 45 | 25 |
| Потери на возбуждение, *вт* | 140 | 140 |
| Электрические потери в контакте, *вт* | 120 | 90 |
| Механические потери в контакте, *вт* | 40 | 10 |
| Суммарные потери, *вт* | 485 | 325 |
| К. п. д., % | 82 | 75,5 |

**Импульсные генераторы.** Ниже будут рассмотрены основные данные и конструктивные схемы некоторых униполярных генераторов, предназначенных для импульсных режимов работы. За небольшой интервал времени (от десятых долей до нескольких секунд) внезапного короткого замыкания цепи якоря генератора часть кинетической энергии, запасенной ротором в процессе разгона, преобразуется в энергию электрического импульса.

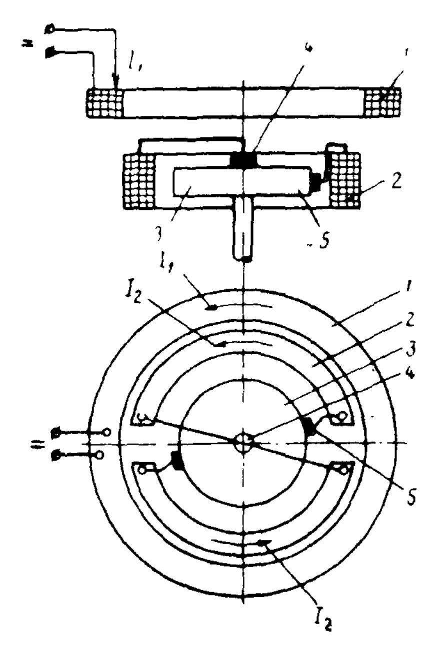
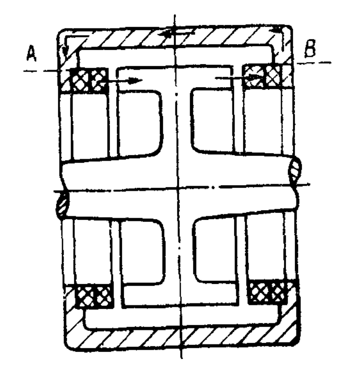



Рис. 45. Принципиальная схема импульсного униполярного генератора с параллельной и последовательной обмотками возбуждения

На рис. 45 показана принципиальная схема одного из таких униполярных генераторов [83], который используется для получения импульсов тока, достигающих 56 *ка*, в цепи бетатрона. При скорости вращения в 19000 *об/мин* и величине индукции магнитного поля генератора, равной 0,4 *вб/м²*, напряжение на зажимах якоря составляет всего 2,5 *в*. В машине отсутствует магнитопровод из стали. Поле создается двумя возбуждающими обмотками: независимого питания *1* и последовательной с якорем *2*. На рис. 45 стрелками показано согласное направление токов в указанных обмотках, необходимое для создания наибольшего магнитного поля.




Ротор выполнен в виде диска *3* из сплава меди с бериллием (98% Cu и 2% Be). Прочность диска соответствует прочности инструментальной стали. Это обеспечивает высокую угонную скорость вращения диска — 30 000 *об/мин*. Ротор приводится во вращение сжатым воздухом, для чего в нем предусмотрены отверстия, выполняющие роль лопаток турбины.

Токосъем осуществляется струевым ртутным контактом. При диаметре «щетки» 3,2 *см* (*4* и *5*) плотность тока в струе ртути составляла 4000 *а/см*$^2$. Окружная скорость на периферии диска равна 150 *м/сек*. Величина сопротивления замкнутой цепи якоря с учетом последовательной обмотки возбуждения, которая одновременно является обмоткой бетатрона, снижена до $2 \cdot 10^{-5}$ *ом*.

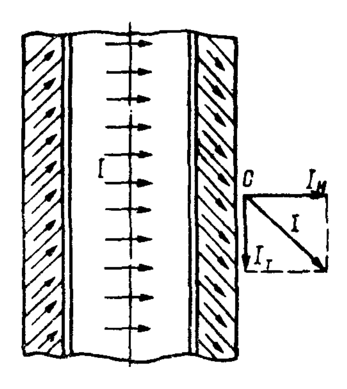



Рис. 46 Принципиальная схема импульсного униполярного генератора с самовозбуждением

$I_н$ — нормальная составляющая тока; $I_т$ — тангенциальная составляющая

Другая оригинальная принципиальная схема униполярного генератора приведена на рис. 46, с помощью которой авторы [73] исследовали возможность получения сильных магнитных полей. В связи с этим у генератора, как и в предыдущей конструкции, совершенно отсутствуют элементы из ферромагнитных материалов.

Внутренний диск и охватывающий его цилиндр вращаются в противоположные стороны. По направлению *AB* в диске и цилиндре индуктируются электродвижущие силы. В воздушный зазор между вращающимися частями на короткое время впрыскивается ртуть, тем самым создается замкнутый контур, по которому будет протекать ток. Линии тока показаны на рисунке стрелками. В области между поверхностями диска и цилиндра возникнет сильное магнитное поле. Для испытанного лабораторного образца небольшого униполярного генератора оказалось возможным в течение 0,1 *сек* получить ток в 300 *ка* (при этом рассеиваемая мощность 100 *квт*), который создал в указанной зоне магнитное поле с индукцией $B = 0{,}5$ *вб/м*$^2$.

По выражению для напряженности поля

$$H = \frac{I}{\pi D_р}$$

определим принятый диаметр диска машины

$$D_р = \frac{\mu_0 I}{\pi B} .$$

Согласно приведенным данным получим: $D_р = 24$ *см*.

Интересно решена задача создания поля возбуждения генератора. Оно образуется токами двух колец, причем одно из них питается от вспомогательного источника и создает начальное поле, которое вызывает нарастание тока якоря. Ток, протекая по второму специальному кольцу, еще более усиливает магнитное поле возбуждения генератора. Для получения требуемого направления поля это кольцо разделено на отдельные элементы с помощью наклонных канавок, заполненных изоляцией. В результате ток протекает под углом к оси вращения диска, что дает тангенциальную составляющую $I_т$ (см. рис. 46), которая обусловливает намагничивающую силу вдоль оси кольца. Необходимое радиальное направление результирующего поля возбуждения машины достигается согласованием углов наклона канавок на левом и правом кольцах.

Уникальный импульсный генератор дискового типа на пик тока в 1600 *ка* при начальном напряжении 800 *в* был разработан и прошел успешные испытания в Австралийском национальном университете [71, 41]. Генератор предназначен для создания пульсирующего тока (примерно синусоидальной формы) в обмотке возбуждения орбитального безжелезного магнита протонсинхротрона на 10 млрд. электрон-вольт. Необходимо указать, что в СССР для аналогичных целей была применена система с синхронными машинами и вентилями [3]. В течение периода нарастания тока в обмотке магнита синхрофазотрона игнитроны работают в режиме выпрямления, питаясь от синхронных генераторов. После достижения током наибольшего значения игнитроны переводятся в инверторный режим, а синхронные машины начинают работать в двигательном режиме, преобразуя электромагнитную энергию поля обмотки магнита в кинетическую энергию вращающихся масс.

Принципиальная схема униполярного генератора дана на рис. 47. Два ротора с вертикальными осями вращаются в противоположные стороны со скоростью 900 *об/мин*. Каждый ротор состоит из двух изолированных друг от друга стальных дисков *7*, каждый из которых имеет диаметр 354 *см*, толщину 25,4 *см*, вес 20 *т*. Общий вес генератора составляет 1500 *т*. Диски попарно насажены на валы *1*, которые вращаются в упорных подшипни-

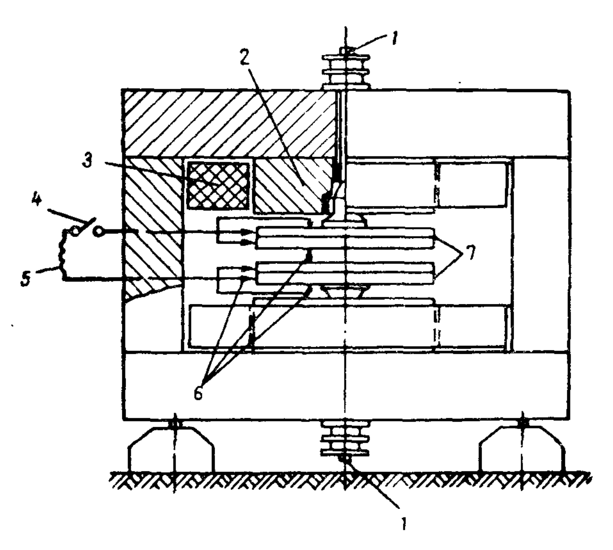



Рис. 47. Принципиальная схема импульсного униполярного генератора на напряжение 800 *в*

ках. Между цилиндрическими полюсами электромагнитов 2 (с диаметрами 376 *см*) создается равномерное магнитное поле с помощью катушек возбуждения 3. Расстояние между указанными полюсами 156 *см*. Для замыкания силовых линий поля имеется прямоугольное ярмо. Цепь возбуждения питается от генератора мощностью 750 *квт*. При индукции в межполюсном пространстве 1,6 *вб/м*$^2$ в каждом диске наводится э.д.с., равная 200 *в*. С помощью струйных контактов 6 диски соединяются последовательно и через жидкометаллический прерыватель 4 замыкаются на обмотку 5 магнита синхротрона.

В качестве жидкометаллической среды применен эвтектический сплав натрия с калием (NaK), который выбрасывается через форсунки на движущиеся поверхности дисков. Благодаря большой скорости истечения жидкости струя не успевает сильно нагреться. Токосъем осуществляется с периферии дисков и на кольцах диаметром 122 *см* с помощью непрерывных плоских (листовых) струй, подводимых радиально вокруг дисков. Через все форсунки за время работы в течение 1 *сек* выбрасывается свыше 1 *т* жидкого сплава NaK. При испытании контакт удовлетворительно выдержал в течение около 0,2 *сек* импульс тока, равный 1800 *ка*. Для нагрузки использовалась электролитическая ванна, к которой ток подводился системой алюминиевых шин. Так как значительная часть кинетической энергии униполярного генератора теряется за счет нагрева стальных дисков (до 10° С за один импульс), то предусмотрен отвод тепла с по-

мощью водяного охлаждения в перерыве между импульсами. Расчетная периодичность импульсов составляет порядка 10 *мин*.

Разгон роторов униполярной машины производится в двигательном режиме при питании ее силовой цепи от выпрямительной установки постоянного тока. Требуемый ток в 3000 *а* подводится дополнительными струевыми контактами. Кинетическая энергия двух роторов при скорости вращения 900 *об/мин* составляет $6 \cdot 10^8$ *дж*. Перед замыканием силовой цепи подается сплав через форсунки.

Компактную конструкцию импульсного генератора на повышенную скорость вращения разработала фирма Allis Chalmers [47]. На рис. 48 показан продольный разрез импульсного генератора. При скорости вращения 7200 *об/мин* он рассчитан на начальное напряжение 30 *в* и ток 60 *ка*. За счет форсирования возбуждения генератор обеспечивает импульс тока в 300 *ка*, величина которого автоматическим регулированием в течение 3 *сек* поддерживается постоянной с точностью до 1%, независимо от сопротивления нагрузки. Время достижения максимального тока составляет 1 *сек*.

Генератор имеет высокое использование материалов, представляя собой цилиндр, плотно заполненный стальными и медными частями. Относительный вес на единицу мощности подобных конструкций согласно [47] может быть достигнут порядка 1,3 *кг/квт*.

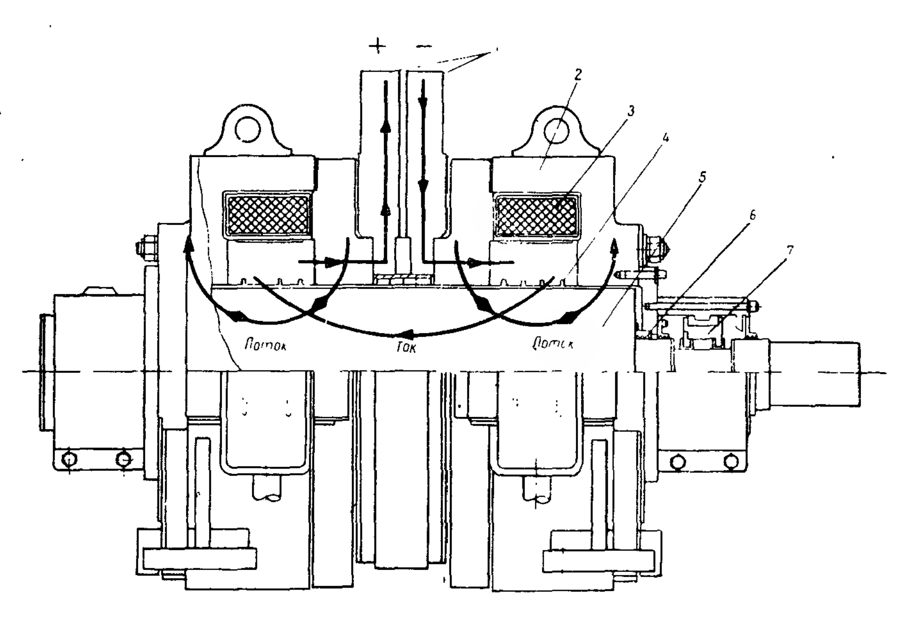



Рис 48. Продольный разрез импульсного униполярного генератора фирмы Allis Chalmers на 300 *ка*

Конструктивная схема рассматриваемого генератора относительно проста. Стальной кованый ротор *5* охватывается стальным массивным статором *2*. Две кольцевые катушки *3* создают поле возбуждения, направление силовых линий которого показано на рис. 48. Съем тока осуществляется с помощью сплава NaK (56% Na и 44% K), который подается в канавки специального устройства *4*. Конструкция этого устройства позволяет не опасаться осевого смещения вала, поэтому машина не нуждается в торцевых подшипниках. Применяются подшипники качения *7*. Линии тока, как это показано на рисунке, пройдя через ротор и токосъемные устройства, собираются в центральной части, где расположены сборные шины *1*. Таким образом, обеспечивается компенсация реакции тока якоря. Внутренняя полость генератора заполнена сухим азотом с небольшим избыточным над атмосферным давлением. Корпус должен быть хорошо герметизирован *6*.

Генератор приводится во вращение через мультипликатор асинхронным двигателем мощностью 1850 *квт*. Исследовательский центр NASA применяет рассмотренный агрегат с импульсным униполярным генератором для питания обмоток электромагнита, который способен создать сильное магнитное поле с индукцией до 10 $вб/м^2$.

Номинальные данные униполярных генераторов подобной рассмотренной выше конструкции изменяются в определенных пределах. Например, в Мичиганском университете находится в эксплуатации импульсный генератор, имеющий номинальный ток 60 *ка*, максимальный 300 *ка*, напряжение 40 *в*, скорость вращения 10 000 *об/мин*; в Калифорнийском университете машина предназначена для получения импульса тока до 1500 *ка* и используется для обеспечения энергией специальных ядерных установок.

**Генератор фирмы General Electric.** На рис. 49 показан униполярный генератор, изготовленный фирмой GEC [43]. Он рассчитан на длительный режим работы в течение нескольких лет без останова для ухода и ремонта. Вспомогательные агрегаты (насосы, теплообменники) находятся вне генератора и допускают использование резервных устройств без останова машины.

Номинальные данные генератора: мощность 10 *Мвт*, напряжение 67 *в*, ток 150 *ка*, скорость вращения 3600 *об/мин*, мощность возбуждения 0,1% от полной.

Вес машины — 25 *т*, следовательно, вес на единицу мощности 2,5 *кГ/квт*. Габариты (включая муфты сцепления): длина — 356 *см*, высота — 178 *см*, ширина — 256 *см*. К.п.д. генератора более 98%, тогда как к.п.д. современных мощных коллекторных машин постоянного тока не более 94—95%.

Для токосъема используется эвтектический сплав натрия с калием (температура плавления — 12° С).

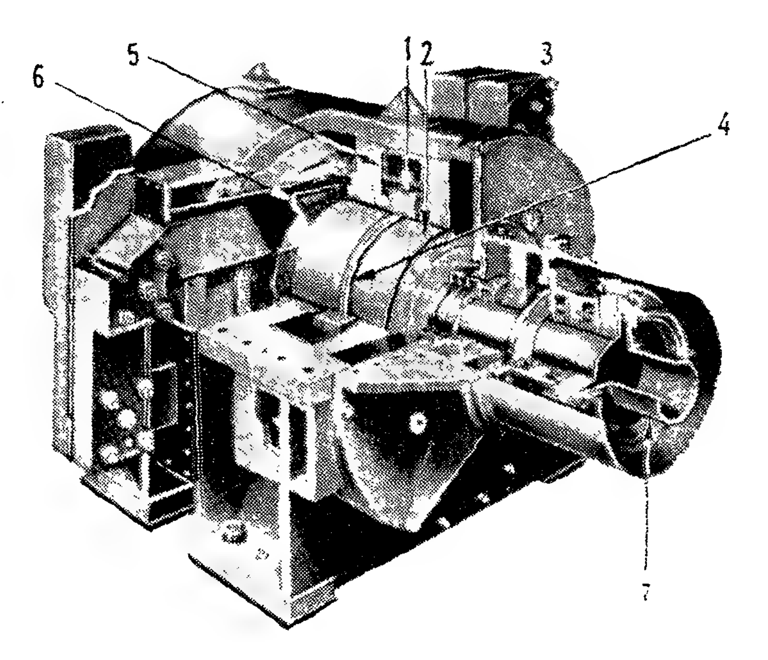



Рис. 49 Униполярный генератор фирмы General Electric на ток 150 *ка*

На рис. 49 «вырезана» 1/8 часть корпуса, что позволяет хорошо видеть отдельные внутренние части генератора: внешний токосъем *1*, стальной ротор *2*, стальной корпус статора *3*, токосъемное кольцо *4*, катушка возбуждения *5*, медные выводные шины *6*, эластичная муфта сцепления *7*.

Во избежание окислительных реакций химически активного сплава NaK корпус герметизирован, а его внутренняя полость заполнена сухим азотом под небольшим избыточным давлением над атмосферным. На валу имеются масляные уплотнения. Кроме основных подшипников, предусмотрены торцевые, не допускающие смещения вала вдоль оси. Эта предосторожность связана со спецификой конструкции токосъемного устройства: кольцо ротора *4* заходит в соответствующую канавку внешнего кольцевого токосъемника, так что между их поверхностями должен образоваться небольшой равномерный зазор, который при работе заполняется сплавом NaK. Расчеты показывают, что для обеспечения минимальных электрических и механических потерь (от трения жидкометаллического сплава NaK) в контактном устройстве рассматриваемого генератора указанный зазор должен быть равен около 3 *мм*.

Интересно отметить, что в ранее рассмотренном импульсном униполярном генераторе фирмы Allis Chalmers (см. рис. 48) токосъемное устройство имело несколько иное конструктивное

решение. Эксплуатация этого устройства не требовала ограничений на возможное в работе осевое перемещение ротора.

В генераторе фирмы GEC для замыкания магнитного потока имеются боковые кольцеобразные сердечники, в то время как торцевые крышки корпуса выполнены из немагнитного материала.

От токосъемных устройств ток проходит вдоль оси вращения к средним отводящим шинам через цилиндрические медные стержни, на которых, по-видимому, крепится внешнее токосъемное кольцо. Эти стержни размещены в пазах среднего сердечника наподобие компенсационной обмотки у коллекторных машин постоянного тока. Так как протекающие по ротору и статору токи имеют противоположные направления, то в результате достигается удовлетворительная компенсация реакции тока якоря.

Компенсационные стержни, внешние токосъемные кольца и отводящие шины надежно изолированы от корпуса. Ротор посредством специальной эластичной муфты сцепления изолирован от приводного двигателя (турбины).

Охлаждение генератора принудительное. Тепловая энергия из зоны контакта отводится сплавом NaK, который циркулирует по замкнутой системе, охлаждаясь в теплообменнике. Так как токосъемники имеют различные потенциалы, то для каждого устройства необходима отдельная циркуляционная система, изолированная от земли. Остальная тепловая энергия отводится из машины или при помощи охлаждения пустотелых проводников водой, или за счет циркуляции азота, находящегося в корпусе машины. Жидкостное охлаждение выводных шин позволяет существенно уменьшить их поперечное сечение.

Кроме рассмотренного генератора, фирма GEC изготовила генератор на ток 550 *ка* и напряжение 45 *в* при скорости вращения 1800 *об/мин* (его внешний вид см. на рис. 3). Генератор в отличие от рассмотренных выше двух конструкций имеет стояковые подшипники.

**Некоторые проекты униполярных машин.** На рис. 50 показана схема униполярного генератора с вертикальным валом по проекту Дас Гупта [53]. Автор стремится доказать целесообразность выполнения машин с двумя вращающимися в противоположные стороны роторами, что позволяет увеличить вдвое напряжение. Правда, для последовательного соединения двух колоколообразных роторов требуется дополнительный третий электрический контакт *4*, однако поскольку он выполняется на окружности малого диаметра, то увеличение механических потерь от трения жидкости в контакте относительно невелико.

Достоинством рассматриваемой конструкции является также взаимная компенсация магнитных полей от токов, которые протекают в роторах, так как эти токи имеют противоположные направления один относительно другого. Магнитное поле маши-

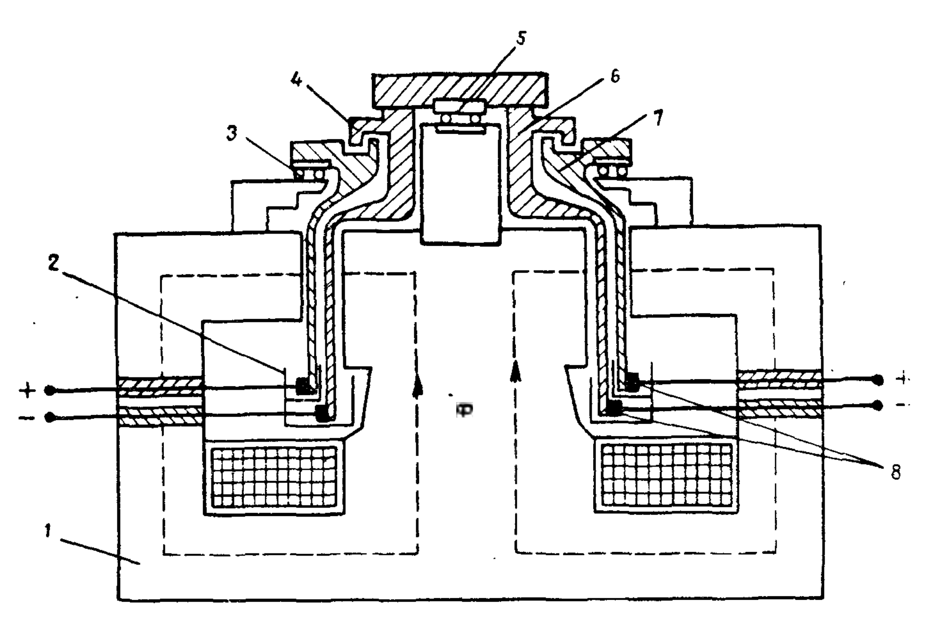



Рис. 50. Эскиз униполярного генератора с двумя колоколообразными роторами
*1* — магнитопровод; *2* — ванна; *3, 5* — упорные подшипники; *4, 8* — контакты; *6* — внутренний диск; *7* — наружный диск

ны в магнитопроводе *1* возбуждается тороидальной катушкой. Для уменьшения намагничивающей силы обмотки роторы целесообразно выполнять стальными.

Разновидностью униполярной машины рассматриваемого типа является схема с одним колоколообразным ротором, но с вращающимся внутренним стальным цилиндром.

Общим недостатком униполярных машин с усложненной конструктивной схемой является необходимость обеспечения весьма точной сборки. В противном случае появление магнитной асимметрии обусловливает возникновение вихревых токов, снижающих к.п.д. машины, а также сильных механических ударов при внезапном изменении тока нагрузки. Отмеченные явления, в частности, заставили изобретателей униполярных машин в прошлом отказаться от конструкций с колоколообразными роторами.

В последние годы в Австрии изучается возможность использования униполярных машин в качестве тяговых двигателей и преобразователей вращающего момента для железнодорожных локомотивов [65]. Исследователей привлекают простота конструкции, высокая перегрузочная способность по току и повышенная надежность униполярных машин. Предполагается, что использование жидкометаллического контакта струевого типа позволит получить высокий к.п.д. двигателей. По заданию управ-

ления государственных железных дорог Австрии Высшей технической школой в г. Грац совместно с фирмой Henschel-Werken ведутся работы по созданию тяговых униполярных двигателей локомотива, пробег которого будет более 300 000 *км* без ревизий двигателей.

В [65] дано описание оригинальной схемы преобразователя вращающего момента, который представляет собой как бы конструктивную комбинацию четырех униполярных машин (рис. 51). Задача преобразователя заключается в том, чтобы при заданном режиме первичного двигателя (например, дизеля локомотива) его мощность использовалась полностью при любой скорости вращения тягового двигателя. Это соответствует гиперболическому закону изменения напряжения в функции тока у генератора постоянного тока.

Механическая энергия дизеля при помощи двух униполярных генераторов $G_1$ и $G_2$ преобразуется в электрическую энергию, которая используется двумя униполярными двигателями $M_1$ и $M_2$. Роторы генераторов $G_1$ и $G_2$ посажены на вал дизеля, а роторы двигателей $M_1$ и $M_2$ — на полый вал, через отверстие которого проходит вал дизеля. Полый и литой валы вложены в подшипники, которые находятся в неподвижных стальных вкладышах $Z_1$ и $Z_2$. Каждая пара машин $G_1$ и $M_1$, а также $G_2$

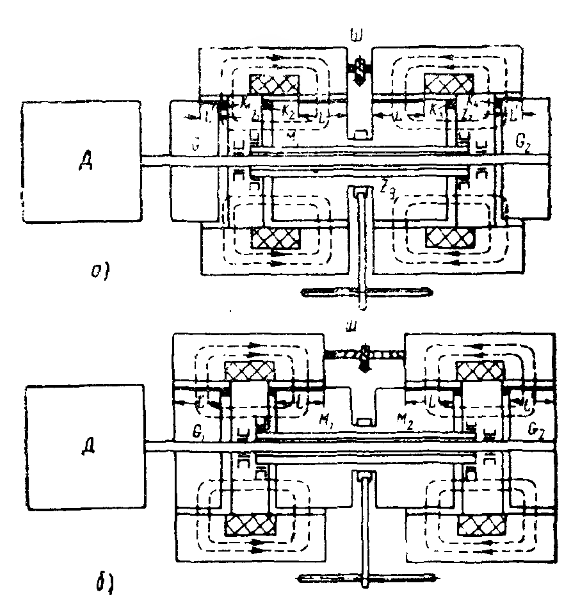



Рис. 51. Продольный разрез униполярного преобразователя момента вращения

*а* - пусковое положение; *б* рабочий режим

и $M_2$ имеет свою магнитную систему, магнитный поток в которой создается обмоткой возбуждения, уложенной на статоре. Электрически все четыре машины соединены последовательно. Электрический ток, генерируемый на активной длине $L'$ ротора генератора $G_1$, проходит через струевой контакт $K_1$ — вкладыш $Z_1$ — струевой контакт $K_2$ — роторы двигателей $M_1$ и $M_2$ — струевой контакт $K_3$ — вкладыш $Z_2$ — струевой контакт $K_4$ — ротор генератора $G_2$ — вал дизеля — ротор $G_1$. Привод от дизеля осуществляется или непосредственно, как показано на рис. 51, или для увеличения скорости вращения роторов генераторов через мультипликатор. Привод к колесным парам локомотива предусматривается через редуктор $Z_в$. Регулирование напряжения и тока генераторов $G_1$ и $G_2$ намечается осуществлять механическим способом посредством передвижения статорных магнитопроводов винтовым устройством *Ш*. На рис. 51, *а* показано пусковое положение, обеспечивающее небольшое напряжение, бóльшие ток и вращающий момент.

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме создания надежных возбудительных систем для мощных турбогенераторов. Требуемая для возбуждения мощность у современных турбогенераторов на 200—500 *Мвт* составляет 0,8—2,5 *Мвт*; поэтому применение быстроходных коллекторных машин-возбудителей становится невозможным по условию обеспечения надежной коммутации. Возникают также известные трудности, связанные с быстрым износом твердых щеток и большими потерями на контактных кольцах турбогенератора.

В этих условиях наряду с совершенствованием перспективных возбудительных систем на полупроводниковых вентилях определенный практический интерес представляет возможность использования униполярных возбудителей. Подобная идея выдвигалась еще в 30-х годах, однако несовершенство униполярных машин явилось одной из причин невозможности ее практической реализации. Промышленное освоение жидкометаллического контакта делает реальным его применение для подключения обмотки возбуждения мощных турбогенераторов.

В связи с изложенным выше представляется целесообразным объединить в одном компактном устройстве, вращающемся на валу турбогенератора, специальный униполярный генератор и контактные кольца турбогенератора*. Например, это можно сделать на базе униполярного генератора конструкции фирмы General Electric (см. рис. 49), выполнив в зоне выводных шин *6* дополнительное жидкометаллическое устройство для ввода тока в центральное отверстие ротора. При охлаждении обмотки возбуждения турбогенератора водой, подаваемой через это отверстие, токоподводящие шины одновременно будут охлаждаться.

---

* Предложено Л. А. Сухановым.

Гашение поля возбуждения турбогенератора может быть обеспечено обычным способом, т. е. автоматом гашения, который подключается к шинам *6*.

Так как униполярная машина является низковольтной, то обмотка возбуждения генератора должна быть выполнена также на пониженное напряжение (25—60 *в*) вместо 300—500 *в*, которое в настоящее время применяется. Такое требование легко удовлетворяется за счет соответствующего уменьшения в пазах ротора турбогенератора числа последовательных проводников обмотки возбуждения при сохранении площади общего сечения меди в пазу. Отметим, что последнее облегчает непосредственное охлаждение обмотки возбуждения водой, а уменьшение напряжения даст экономию на изоляции.

Наиболее трудной задачей является повышение быстродействия униполярного возбудителя до требуемого условиями эксплуатации турбогенератора уровня. Чтобы удовлетворить ГОСТ 533—51, необходимо обеспечить нарастание до двухкратного от номинального напряжения возбудителя с постоянной времени 0,3—0,4 *сек*. Соответствующие расчеты униполярного возбудителя показывают, что обеспечить указанное быстродействие принципиально возможно, если:

1) магнитопровод статора выполнить шихтованным;

2) в теле ротора (в зоне полюсов) профрезеровать вдоль оси вращения глубокие канавки для ограничения реакции вихревых токов * (либо выполнить ротор составным);

3) крайние токосъемные кольца разделить на отдельные изолированные между собой сегменты;

4) в цепь возбуждения униполярного возбудителя включить добавочное сопротивление.

**Униполярный преобразователь.** Интересный преобразователь переменного тока в постоянный (напряжением до 20 *в* и тока порядка 100 *ка*) предложил В. Ли [128]. В нем совмещены принципы работы асинхронного жидкометаллического насоса и униполярного генератора. Схематически преобразователь, который можно назвать «униполярным», показан на рис. 52.

Статоры (внешний *1* и внутренний *2*) набраны из листовой электротехнической стали. В пазы внешнего статора уложена трехфазная обмотка ** переменного тока *3*. Протекающий по обмотке ток создает вращающееся относительно вертикальной оси магнитное поле. Между отмеченными кольцеобразными статорами расположен цилиндрический сосуд, заполненный жидкометаллической средой *4*. Вращающееся магнитное поле будет ин-

---

* В зоне жидкометаллического контакта канавки закрыть клиньями из неэлектропроводного материала.

** В общем случае это может быть двухфазная или многофазная.

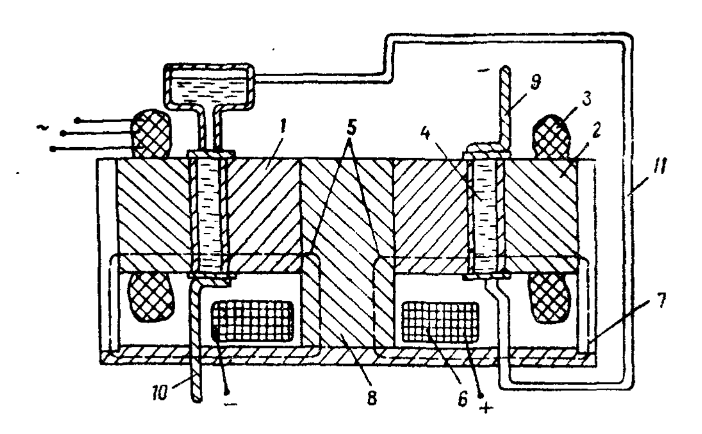



Рис. 52. Униполярный преобразователь переменного тока в постоянный по проекту Вильяма

дуктировать вихревые токи в электропроводной среде, которая в результате этого будет вращаться с некоторым скольжением.

«Униполярный» магнитный поток *5*, силовые линии которого будут замыкаться по центральному стальному сердечнику *8* и корпусу *7*, как это показано на рисунке, создается с помощью катушки возбуждения *6*. Электродвижущая сила постоянного направления, которая индуктируется во вращающейся относительно силовых линий униполярного поля жидкометаллической среде, снимается шинопроводами *9* и *10*. Для охлаждения среды предусмотрена ее циркуляция по замкнутой системе *11*. В качестве среды может быть использован любой электропроводный сплав, находящийся в жидкой фазе при относительно невысокой температуре. В частности, вихревые токи, индуктируемые в жидкометаллической среде, в случае необходимости могут быть использованы для разогрева сплава перед началом работы. Для уменьшения намагничивающей силы обмоток переменного тока, естественно, следует стремиться к возможно меньшему зазору между статорами *1* и *2*. С этой точки зрения, по-видимому, целесообразно цилиндрический сосуд под жидкий сплав изготовлять из ферромагнитного материала, а в сплав добавлять стальные опилки. Оценка коэффициента полезного действия подобного устройства автором не дается, однако можно ожидать, что к.п.д. будет относительно невысок, так как будут возникать значительные дополнительные потери, отсутствующие в классических электрических машинах. Например, электрические потери в оболочке, которая заключает жидкость, гидродинамические потери, обусловленные движением жидкости, а также потери в торцовых частях.

В 1963 г. преобразователь рассмотренного типа был построен и испытан во Франции [76]. Продольный разрез машины показан

на рис. 53. Условно ее можно представить состоящей из трех основных частей: жидкостной, асинхронной и униполярной. Жидкость 4 заключена между стенками двойного цилиндра, расположенного в воздушном зазоре. Асинхронная часть включает трехфазную обмотку переменного тока 1 и шихтованного магнитопровода 2 и 3. Униполярная часть имеет магнитопровод из мягкого железа 6, на котором помещена обмотка возбуждения 5. Она питается от источника постоянного напряжения. В качестве жидкометаллической среды наиболее подходящим оказался натрий. Опыты с индиевой ртутью были малоудовлетворительными (скольжение жидкости относительно вращающегося электромагнитного поля было чрезмерно большим, около 80%). Испытанию подверглась четырехполюсная машина * с рабочей температурой натрия 150° С. Основные данные преобразователя: средний диаметр воздушного зазора — 225 *мм*, односторонний воздушный зазор — 8 *мм*, высота слоя жидкости в цилиндре — 45 *мм*, линейная синхронная скорость — 18 *м/сек*, максимальная индукция вращающегося поля — до 0,4 *вб/м*$^2$, постоянная индукция униполярного поля — до 0,7 *вб/м*$^2$. Главная трудность заключалась в создании герметического канала для натрия. Стенки цилиндра были сделаны из нержавеющей стали толщиной 0,45 *мм*, торцевые части — из приваренных к ним медных колец.

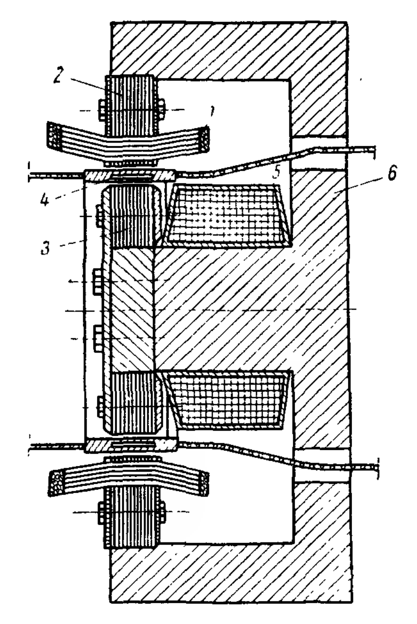



Рис. 53. Униполярный преобразователь переменного тока в постоянный

На одной торцевой поверхности были сделаны наконечники из нержавеющей стали, к которым был присоединен параллельно насос с жидким натрием. Машина была включена со стороны постоянного тока на нагрузочное сопротивление 50 *мком*, которое выполнено из медных жгутов, соединенных параллельно, и рассчитано на ток 8000 *а*. При испытаниях максимальное значение тока составляло 1000 *а*, напряжение — 0,2 *в*, к.п.д. 8—9%.

* Для повышения к.п.д. преобразователя автор предполагает увеличить число полюсов с целью снижения синхронной скорости вращения поля.

В заключение отметим, что преобразователь допускает обращенный режим. Если к торцевым частям цилиндров приложить постоянное напряжение, то через жидкость будет проходить постоянный ток. В результате взаимодействия тока с униполярным магнитным потоком возникает сила, которая сообщит жидкости некоторую среднюю линейную скорость. Если эта скорость больше синхронной скорости магнитного поля, то энергия постоянного тока будет преобразовываться в энергию переменного тока аналогично тому, как это имеет место у асинхронной машины в генераторном режиме.

## IV. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ УНИПОЛЯРНОЙ МАШИНЫ

Целью расчета магнитной цепи любой электрической машины является определение необходимой величины намагничивающей силы обмотки возбуждения, способной обеспечить заданный магнитный поток полюсов. Для униполярной машины наибольшие трудности вызывает нахождение составляющей намагничивающей силы обмотки возбуждения на проведение потока через ротор. Это связано со сложным характером распределения магнитного поля в стали ротора. Сильное насыщение стали ротора током нагрузки и относительно небольшой воздушный зазор униполярной машины делают сопоставимыми величины намагничивающих сил на зазор и сталь ротора.

В [64, 75] дается главным образом качественное рассмотрение методики определения намагничивающей силы на ротор. В связи с этим ниже нами будет разработан метод расчета намагничивающей силы на ротор, который в первом приближении позволяет определить ее величину.

Вторым важным вопросом, обусловленным спецификой униполярной машины, является расчет коэффициента рассеяния потока кольцевых полюсов. Это необходимо для правильного расчета намагничивающей силы на полюса, а также определения коэффициента рассеяния обмотки возбуждения.

Определение намагничивающих сил на такие участки магнитной цепи машины, как воздушный зазор, полюса, спинка ярма, не вызывает затруднений. Необходимые формулы будут даны в примере расчета униполярного генератора (раздел VII).

### РАСТЕКАНИЕ ТОКА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ РОТОРЕ

Определение закономерности растекания тока в теле ротора униполярной машины представляет большой практический интерес. От характера растекания тока зависит как магнитное насыщение стали ротора при нагрузке, так и электрические потери энергии в нем. В свою очередь распределение потерь определяет температурное поле ротора.

Нахождение плотности тока в роторе униполярной машины представляет собой трудно разрешимую задачу. Сложность заключается в том, что распределение плотности тока в роторе зависит не только от его геометрических размеров и местоположения токосъемных устройств, но также от распределения напряженности магнитного поля в теле ротора (с учетом явления насыщения стали). Отмеченное положение следует из работы [32], где на стр. 551 показано, что распределение токов по объему вращающегося ротора униполярной машины будет таким же, как в случае покоящегося ротора, по объему которого распределены сторонние э.д.с., соответствующие напряженности магнитного поля в теле ротора. Для любой точки среды будет иметь место следующее векторное соотношение:

$$\bar{E} = \bar{v} \times \bar{B}, \bar{j} = \sigma \bar{E},$$

где $\bar{E}$ — вектор напряженности электрического поля;
$\bar{B}$ — вектор результирующей магнитной индукции;
$\bar{v}$ — вектор линейной скорости среды в рассматриваемой точке;
$\bar{j}$ — вектор плотности постоянного тока;
$\sigma$ — электрическая удельная проводимость.

С целью получения некоторого представления о характере растекания тока в роторе униполярной машины целесообразно рассмотреть частную задачу растекания тока в неподвижном цилиндрическом роторе, когда к паре кольцевых контактов, расположенных на его наружной поверхности, от внешнего источника приложено постоянное напряжение. Как известно из [25], электрическое поле постоянных токов, протекающих в неподвижных проводниках, является электростатическим, а в области вне источников э.д.с. — потенциальным. К таким полям применим графический метод построения силовых линий поля.

Для цилиндрических роторов униполярных машин соотношение диаметра и длины, а также расстояния между контактами сохраняется в первом приближении неизменным. Такое постоянство обусловлено тем, что через поперечное сечение цилиндра и его образующие поверхности, расположенные под полюсами, проходит один и тот же полезный поток машины. При заданных значениях индукций в воздушном зазоре машины и теле ротора, которые практически выбираются близкими между собой, соотношения основных размеров роторов из-за непрерывности магнитного потока оказываются вполне определенными для различных диаметров. Это позволяет рассмотреть растекание тока в теле ротора на единичном примере, распространив полученные выводы на подобные случаи.

В связи с симметрией картины поля * растекания тока в теле

---

* Имеется в виду тип конструкции генератора, показанный на рис. 49.

ротора между парой кольцевых контактов достаточно рассмотреть только одну его половину. Целесообразно начать с анализа плоской задачи поля.

Предположим, что цилиндрический ротор рассечен плоскостью вдоль оси вращения. Рассмотрим плоскую картину растекания тока от правого контакта верхней четверти сечения ротора (рис. 54), которая нанесена по известным правилам графического построения потенциальных полей. Из определения понятия силовой трубки следует, что через любое поперечное сечение каждой трубки протекает один и тот же ток, причем их омические сопротивления равны между собой. Рис. 54 позволяет заключить, что в левой от контакта части сечения поле тока до-

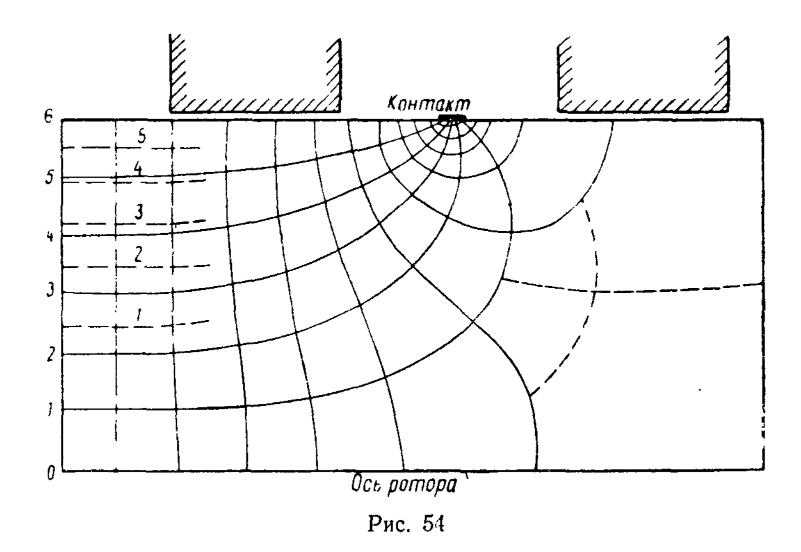



Рис. 54

вольно скоро выравнивается, а в правую ответвляется сравнительно небольшая доля полного тока (примерно шестая часть).

Чтобы получить представление о растекании тока в цилиндре (который образуется вращением рассматриваемого прямоугольника вокруг нижней стороны), определим, на сколько сместятся силовые кольцеобразные трубки левой части, где плоско-параллельное поле с достаточным приближением можно было считать равномерным.

Пронумеруем силовые трубки, как это показано на рисунке, в направлении от оси вверх по радиусу. Исходя из постоянства сопротивлений трубок-колец, получим для первой и второй трубок следующее условие

$$\frac{l_1}{R_1^2} = \frac{l_2}{R_2^2 - R_1^2}, \qquad (7)$$

где $R$ — наружный радиус трубки-кольца;

$l$ — длина трубки между эквипотенциальными плоскостями.

Для последующих трубок ($n \geqslant 2$) получим

$$\frac{R_n^2 - R_{n-1}^2}{R_{n+1}^2 - R_n^2} = \frac{l_n}{l_{n+1}}, \qquad (8)$$

где $n$ — порядковый номер трубки.

Принимая условие, что отношение длин трубок постоянно. можно найти по (7) и (8) выражения для определения искомых радиусов

$$R_2 = \sqrt{2}\, R_1,$$

$$R_{n+1} = \sqrt{2R_n^2 - R_{n-1}^2}\,.$$

Нетрудно показать, что в конечном счете радиусы трубок-колец удовлетворяют следующему условию

$$R_n = \sqrt{n}\, R_1. \qquad (9)$$

При известном радиусе цилиндра $R_p$ и выбранном числе трубок $n=p$, согласно (9), находится начальный радиус $R_1$, после чего для соответствующего ряда значений $n$ определяются радиусы остальных трубок-колец.

В рассмотренном нами случае принято $p=6$. Если положить, что радиус цилиндра $R_6=1$, то соответствующие относительные значения радиусов трубок будут такими, как даны ниже.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ . . . | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| $R_n$ . . . | 0,409 | 0,578 | 0,706 | 0,818 | 0,915 | 1 |

Как и следовало ожидать, кольцеобразные трубки тока (на рис. 54 показаны пунктирными линиями) значительно смещаются к периферии ротора. Однако плотность тока по всему поперечному сечению рассматриваемой средней части бочки ротора будет постоянной величиной. Действительно, для любой $n$-й трубки-кольца имеем

$$j_n = \frac{I}{p\pi\,(R_n^2 - R_{n-1}^2)}$$

или с учетом (9), найдем

$$j_n = \frac{I}{\pi R_1^2\, p}\,.$$

Таким образом, $j_n$ не зависит от порядкового номера трубки, т. е. является постоянным для любой трубки-кольца.

В зоне, прилегающей к контакту, картина растекания тока не должна претерпеть существенных изменений, так как линейные размеры контакта по сравнению с радиусом ротора относительно малы.

Приведенный качественный анализ растекания тока в теле

цилиндрического ротора позволяет сделать следующее заключение:

значительная часть общего тока с постоянной плотностью протекает между плоскостями, проходящими через контактные устройства нормально к оси ротора, и лишь сравнительно небольшая доля (порядка 17%) ответвляется в боковые части ротора;

линии тока в значительной части средней зоны между контактами проходят параллельно оси ротора, в сильной степени смещаясь к его периферии.

Следует помнить, что эти выводы относятся к неподвижному ротору. В то же время в первом приближении можно предположить, что подобный характер явления сохранится для вращающегося в магнитном поле цилиндрического ротора. Поэтому в дальнейшем при расчете намагничивающей силы для проведения рабочего магнитного потока через ротор будем учитывать сильное насыщение стали (от протекания тока) только средней части ротора (в зоне средних полюсов), в то время как боковые зоны примем относительно мало насыщенными.

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В СТАЛИ РОТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ

При холостом ходе генератора, когда в роторе нет тока нагрузки, основная часть намагничивающей силы обмотки возбуждения расходуется на проведение рабочего потока через воздушные зазоры между полюсами и слабо насыщенным ротором. С увеличением тока нагрузки сталь ротора в зоне средних полюсов сильно насыщается, в результате значительно возрастает требуемая намагничивающая сила.

Прежде чем перейти к рассмотрению методики расчета составляющей намагничивающей силы на ротор, установим направления и величины соответствующих векторов напряженностей, действующих в нем. С этой целью выберем в теле ротора произвольную точку $a_1$ (см. рис. 55); через нее и ось вращения ротора проведем радиальную плоскость $R_1$. Обмотка возбуждения в цилиндрической униполярной машине располагается вокруг ротора кольцом, поэтому ток обмотки создаст напряженность магнитного поля в рассматриваемой точке, вектор которого $H_{r1}$ будет обязательно расположен в плоскости $R_1$. Ток нагрузки, который протекает вдоль оси ротора, определит вектор напряженности $H_{\varphi 1}$, нормальный к этой плоскости. Если через векторы $H_{r1}$ и $H_{\varphi 1}$ провести плоскость $N_1$, то их геометрическая сумма определит расположенный в ней вектор результирующей напряженности магнитного поля ротора в выбранной точке. Нарисованный характер картины поля сохранится для любых точек ротора и соответствующих им плоскостей с тем отличием, что величина $H_\varphi$ будет уменьшаться к оси ротора.

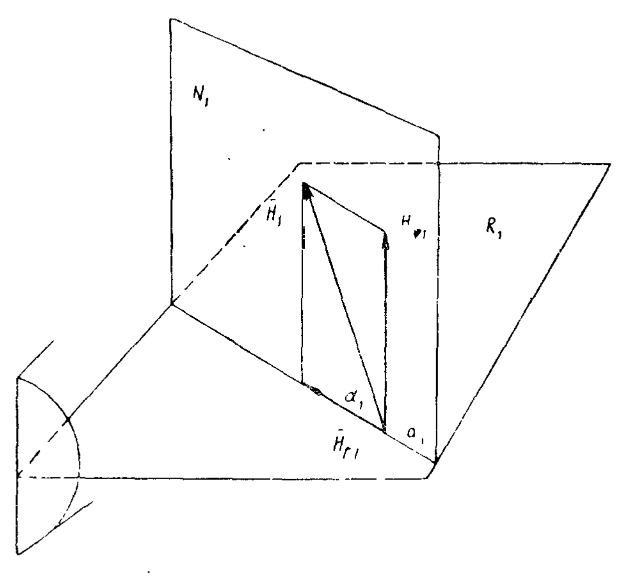



Рис 55

вектор $H_r$ будет изменять величину и направление, оставаясь все время в соответствующих радиальных плоскостях.

Вектор результирующей напряженности определит вектор магнитной индукции

$$B = \mu H, \tag{10}$$

который может быть разложен на направления векторов $H_r$ и $H_\varphi$, как это показано на рис. 56.

Из подобия треугольников векторной диаграммы при наличии изотропности стали имеем:

$$B_r = \mu H_r, \tag{11}$$

$$B_\varphi = \mu H_\varphi. \tag{11a}$$

Кроме того,

$$B_\varphi = \sqrt{B^2 - B_r^2}, \tag{12}$$

откуда

$$B_r = \sqrt{B^2 - (\mu H_\varphi)^2}. \tag{13}$$

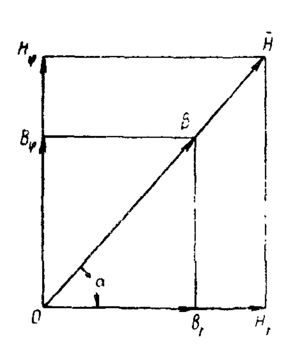



Рис. 56

Полученное выражение позволяет найти зависимость $B_r = f_1(H_r)$ при заданном значении $H_{\varphi 1}$. Действительно, если известна основная кривая намагничивания ферромагнитного материала $B = f(H)$, то, задаваясь, рядом значений индукции $B$, по ней однозначно можно определить соответствующие

величины $H$, а затем $\mu$. Далее по (13) рассчитывается искомая зависимость.

На рис. 57 показана основная кривая намагничивания для стальных поковок роторов турбогенератора, а на рис. 58 — рассчитанные на ее основе описанным выше способом семейства кривых $B_r = f_n\ (H_r)$ для ряда фиксированных значений $H_{\varphi n}$. Здесь же нанесены прямые, выходящие из начала координат, соответствующие постоянству магнитной проницаемости (в долях магнитной проницаемости воздуха).

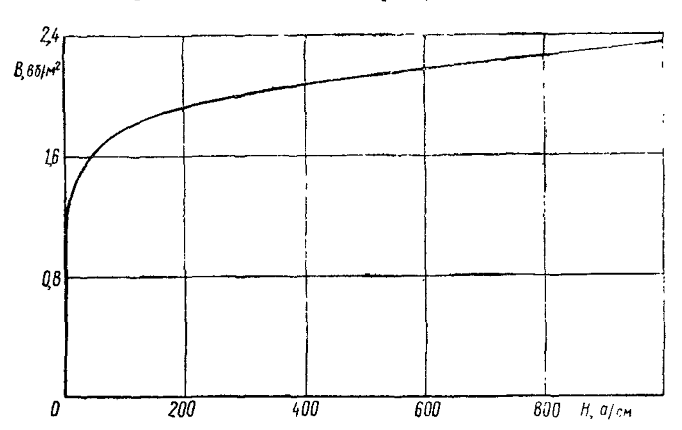



Рис. 57. Основная кривая намагничивания стальных поковок роторов трубогенераторов

Наоборот, если задана величина $B_r$ и известна кривая намагничивания, соответствующая определенному $H_\varphi$, то нетрудно определить результирующую индукцию в стали. Для этого через точку на кривой $B_r = f\,(H_r)$, соответствующую ординате $B_r$, следует провести из начала координат прямую до пересечения с основной кривой намагничивания стали ($H_\varphi = 0$).

Приведенные на рис. 57 и 58 кривые показывают, что стальная поковка может находиться в сильно насыщенном состоянии, в то время как значение индукции $B_r$ много меньше индукции насыщения. Например, для кривой одновременного намагничивания 6 ($H_\varphi = 300$ *а/см*) для индукции $B_r = 1$ *вб/м*$^2$ имеем $\mu = 44{,}5\ \mu_0$, так как указанным значениям по основной кривой намагничивания соответствует результирующая индукция $B$, равная 1,94 *вб/м*$^2$, которая в конечном счете определяет величину $\mu$.

Этим удобно воспользоваться при расчете магнитного состояния роторов униполярных машин на большие токи, допуская, что результирующая индукция во всех точках ротора близка к индукции насыщения стали $B_н \approx 2{,}1 \div 2{,}2$ *вб/м*$^2$, поскольку среднюю индукцию в роторе при холостом ходе выбирают достаточно высокой $B_r = (1{,}4 \div 1{,}6)$ *вб/м*$^2$.

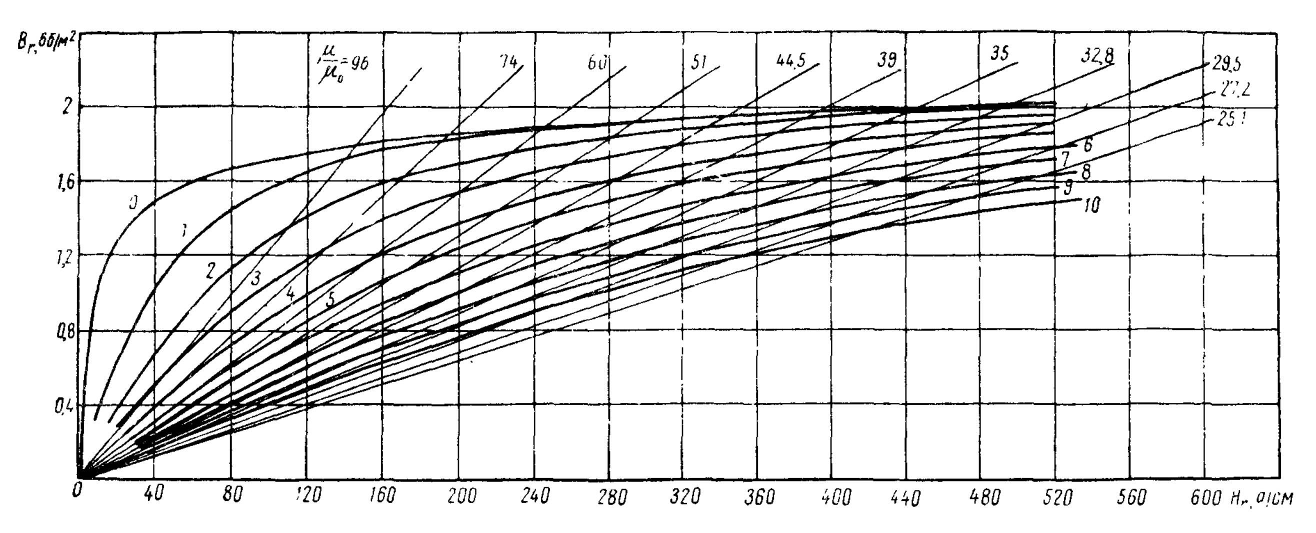



Рис. 58. Кривые намагничивания стали при фиксированной напряженности $H_{\varphi n}$

*1* — 50; *2* — 100; *3* — 150; *4* — 200; *5* — 250; *6* — 300; *7* — 350; *8* — 400; *9* — 450; *10* — 500 *а/см*

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙ СИЛЫ НА РОТОР ПРИ НАГРУЗКЕ

Определим намагничивающую силу на сталь ротора, которую должен создать ток обмотки возбуждения при нагрузке машины током $I$.

Из выражений (11—12), полагая $B=B_н$, нетрудно найти

$$H_r = \frac{B_r H_\varphi}{\sqrt{B_н^2 - B_r^2}}. \qquad (14)$$

При условии, что ток ротора протекает вдоль оси и распределяется по сечению ротора равномерно (см. раздел IV), составляющая напряженности поля $H_\varphi$ зависит только от расстояния $R$ до оси ротора. Действительно,

$$H_\varphi = \frac{I_x}{2\pi R},$$

где

$$I_x = I\,\frac{R^2}{R_р^2}.$$

Таким образом

$$H_\varphi = \frac{I}{2\pi R_р^2}\,R, \qquad (15)$$

где $R_р$ — радиус ротора.

Составляющая намагничивающей силы обмотки возбуждения для проведения рабочего потока через ротор находится согласно выражению

$$F_р = \int_0^L H_r \cos\alpha\, dL, \qquad (16)$$

где $L$ — длина произвольной силовой линии в насыщенной зоне ротора;

$$\cos\alpha = \frac{B_r}{B_н} \text{ (из рис. 56)}. \qquad (17)$$

Силовые линии имеют спиралеподобный вид. Они выходят из полюса и, смещаясь вдоль оси ротора, уходят в глубину его тела. Величины $\cos\alpha \cdot dL$ можно рассматривать как проекции элементарных отрезков силовой линии на плоскости, проходящие через ось ротора и пересекающие эту линию. Совокупность подобных проекций, совмещенных в одной осевой плоскости, образует линию длиной $l$, которую далее будем именовать «расчетной силовой линией». Для определения намагничивающих сил вдоль таких расчетных линий имеем

$$F_р = \int_0^l H_r \cdot dl \qquad (18)$$

с учетом (14) и (15) найдем

$$F_р = \frac{I}{2\pi R_р^2} \int_0^l K_н R \cdot dl, \tag{19}$$

где обозначено через

$$K_н = \left[ \left( \frac{B_н}{B_r} \right)^2 - 1 \right]^{-\frac{1}{2}}. \tag{20}$$

Из выражения (14) следует, что введенная в рассмотрение величина $K_н$ представляет собой отношение составляющих вектора результирующей напряженности в стали ротора, т. е.

$$K_н = \frac{H_r}{H_z}. \tag{21}$$

Для окончательного определения $F_р$ необходимо знать распределение расчетных силовых линий в насыщенной зоне ротора под полюсами. В первом приближении представляется вероятной следующая расчетная картина магнитного поля в стали ротора. После выхода из полюсного башмака шириной $b_m$ основная часть потока $\Phi_р$ (примерно 80%) сосредоточивается на периферии бочки ротора (рис. 59). Силовые линии проходят в теле ротора сначала по дугам окружностей с центром О (который расположен на краю полюса), а затем на длине $l_{mк}$ следуют параллельно оси вращения ротора. Средняя расчетная индукция в теле ротора может быть оценена по формуле

$$B_{r0} = \frac{0{,}8\,\Phi_р}{\frac{\pi}{4}\,[D_р^2 - (D_р - 2b_m)^2]}.$$

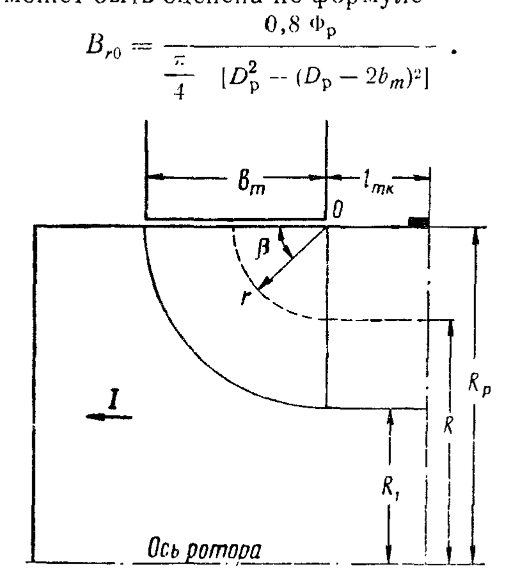



Рис. 59. К расчету падения намагничивающих сил на сталь ротора

После подстановки в эту формулу выходящего из полюса магнитного потока, равного

$$\Phi_р = B_\delta \pi D_р b_m,$$

получим

$$B_{r0} \approx \frac{0,8\, B_\delta\, D_р}{D_р - b_m}. \tag{22}$$

Правомерность сделанных предположений обосновывается следующими соображениями.

1. На рис. 60 построена известным графическим методом картина плоско-параллельного магнитного поля под полюсом при условии постоянства удельной магнитной проницаемости стали. Можно заметить, что основная доля магнитного потока сосредоточена в верхней части сечения. Если учесть цилиндричность ротора, аналогично тому как это было сделано при анализе растекания в нем тока (см. раздел IV, рис. 54), то силовые трубки из-за значительно возросшего магнитного сопротивления в центральной части ротора, еще более окажутся смещенными* к его наружной поверхности. Одновременно будет происходить выравнивание индукции в рассматриваемой зоне.

Описанное смещение трубок из центра ротора будет несколько снижено уменьшением удельной магнитной проницаемости по мере удаления от оси ротора из-за роста напряженности поля, как это следует из выражения (15).

2. На рис. 61 показана зависимость величины $K_н$ от отношения $\frac{B_н}{B_r}$. Из графика следует, что при отношении $\frac{B_н}{B_r} \geqslant 1,3$ по-

* При построении поля не учитывалось центральное отверстие ротора. Оно также способствует концентрации потока около поверхности ротора.

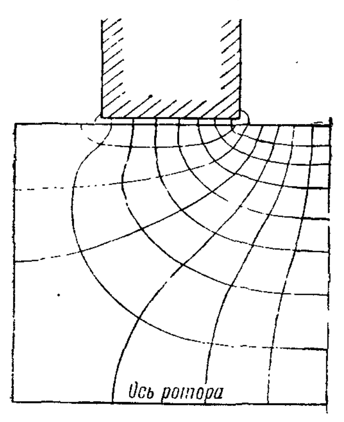



Рис. 60 Картина магнитного поля

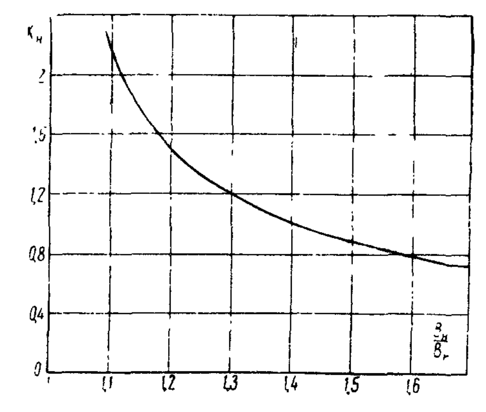



Рис. 61

грешность в задании $B_r$ не может дать существенного отклонения величины $K_н$, а следовательно, и $F_р$.

Таким образом, можно в первом приближении $K_н$ принимать постоянной величиной. В этом случае выражение (19) удобно представить в виде

$$F_р = \frac{H_{rm}}{R_р} \int_0^l R \cdot dl, \tag{23}$$

где величина

$$H_{rm} = \frac{I \cdot K_н}{2\pi R_р} = H_{\varphi m} K_н \tag{24}$$

представляет собой максимальную напряженность поля в роторе от тока обмотки возбуждения.

Перейдем к определению $F_р$ для принятой расчетной схемы (см. рис. 59). Для зоны ротора под полюсом имеем

$$R = R_р - r \sin\beta,$$

откуда по (23) найдем

$$F_{р1} = \frac{H_{rm}}{R_р} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (R_2 - r \sin\beta)\, r d\beta.$$

В результате для заданной радиусом $r$ линии определим

$$F_{р1} = \frac{H_{rm} \cdot r}{R_р} \left( \frac{\pi R_р}{2} - r \right). \tag{25}$$

Для зоны ротора, заключенной между полюсом и контактом токосъема, имеем

$$F_{р2} = \frac{H_{rm}}{R_р} \int_0^{l_{mк}} (R_р - r) \cdot dl,$$

откуда для линии, заданной радиусом $r$, получим

$$F_{р2} = \frac{H_{rm}\, l_{mк}}{R_р} (R_р - r). \tag{26}$$

Суммируя (25) и (26), окончательно найдем намагничивающую силу на полюс, которая необходима для проведения через сталь ротора рабочего магнитного потока при заданных значениях тока и средней индукции в зазоре

$$F_р = \left( l_{mк} + \frac{\pi r}{2} - \frac{r l_{mк} + r^2}{R_р} \right) H_{rm}. \tag{27}$$

Множитель, стоящий перед $H_{rm}$, представляет собой эквивалентные длины $l_э$ расчетных силовых линий, положение которых определяется параметром $r$.

На рис. 62 показана зависимость $l_э$ от отношения $\frac{r}{b_m}$, где $b_m$ — ширина кольцевого полюса.

При расчете были приняты следующие размеры униполярного генератора (при 150 *ка*, 67 *в*, 3000 *об/мин*): $R_р=0{,}4$ *м*; $l_{тк}=0{,}12$ *м*; $b_m=0{,}19$ *м*.

В некотором масштабе представленная кривая также характеризует изменение намагничивающей силы по расчетным силовым линиям. Расчет показал, что среднеарифметическая величина эквивалентной длины ($l'_{эо}=0{,}21$ *м*) близка к длине, определенной при $r=0{,}5b_m$ ($l_{эо}=0{,}22$ *м*).

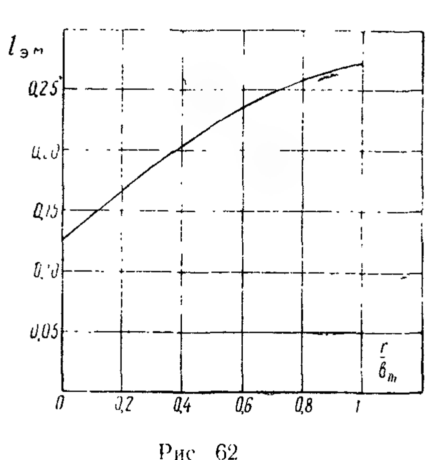



Рис 62

Таким образом, для определения средней величины $F_{ро}$ можно рекомендовать вычисление по (27) при $r=0{,}5\ b_m$.

Представляет интерес оценка величины $F_{ро}$ по сравнению с намагничивающей силой, необходимой для проведения магнитного потока полюса через воздушные зазоры под парой полюсов. При следующих указанных данных: $B_r=1{,}7$ *тл*; $B_н=2{,}2$ *тл* согласно рис. 61 находим, что $K_н=1{,}05$. Если радиус ротора $R_р=0{,}4$ *м* и ток нагрузки $I=150\cdot10^3$ *а*, то согласно (24) найдем, что $H_{\varphi m}=59{,}8\cdot10^3$ *а/м* и $H_{rm}=62{,}8\cdot10^3$ *а/м*. Используя ранее полученное значение $l_{эо}=0{,}22$ *м*, определим, что $F_р=13{,}8\cdot10^3$ *а*. При суммарном воздушном зазоре под двумя полюсами $2\delta=0{,}01$ *м* и $B_{\delta_0}=1{,}7$ *тл* необходима намагничивающая сила, равная $F_\delta=13{,}5\cdot10^3$ *а*.

Таким образом, величины намагничивающих сил на сталь ротора и пару воздушных зазоров под полюсами для принятых данных оказались однопорядковыми величинами.

В связи с относительно большой величиной намагничивающей силы на сталь ротора и ее непостоянством для разных рас-

честных силовых линий распределение индукции в воздушном зазоре под средними* полюсами будет также неравномерным.

Вид кривой на рис. 62 показывает, что наибольшая индукция будет под краем полюса со стороны токосъема. Не представляет сложности рассчитать соответствующую кривую распределения индукции в зазоре машины под средними полюсами.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Магнитная цепь статора может быть разделена на следующие три характерных участка, через которые проходит основной магнитный поток: спинка статора, сердечник полюса и зона полюсного башмака. Для обеспечения точности при расчете намагничивающих сил первых двух участков необходимо учитывать коэффициент рассеяния полюсов, который для униполярных машин достигает существенной величины. В связи с этим получим формулы для его определения.

Аналитическое решение поставленной задачи значительно упрощается, если картину поля рассеяния в полюсном окне рассматривать как плоскую, т. е. пренебречь кривизной катушки возбуждения. Точность полученных при этом выражений будет тем выше, чем меньше отношение высоты катушки возбуждения к ее среднему радиусу $\frac{h_e}{R_e}$. В современных крупных униполярных машинах с непосредственным охлаждением водой катушек возбуждения указанное отношение относительно мало. Например, для приведенного в разделе VII расчета униполярного генератора оно составило всего 0,24.

Коэффициент рассеяния полюсного сердечника представляет собой величину

$$k_ф = 1 + \frac{Ф_s}{Ф}, \qquad (28)$$

где Ф — рабочий магнитный поток;

$Ф_s$ — поток рассеяния.

Рассматривая межполюсное окно как прямоугольный паз электрической машины с проводимостью на единицу длины $\lambda_ф$, получим

---

* Так как в зоне крайних полюсов сталь ротора насыщена относительно слабо, то будет иметь место выравнивание индукции под указанными полюсами

$$k_{\text{ф}} = 1 + \frac{\mu_0 \lambda \pi (D_\text{р} + h_\text{п}) F_\text{е}}{\Phi}, \quad (29)$$

где $F_\text{е}$ — намагничивающая сила обмотки возбуждения на пару полюсов;

$h_\text{п}$ — высота полюсного окна.

Если принять, что силовые линии потока рассеяния между стенками и полюсом являются прямыми линиями, то, как известно,

$$\lambda_\text{ф} = \frac{h_\text{п}}{b_\text{п}},$$

где $b_\text{п}$ — ширина полюсного окна.

Точное выражение для линейной проводимости паза, учитывающее действительную картину магнитного поля рассеяния, имеет вид [30]

$$\lambda_\text{ф} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2\delta}{b_\text{п}}\right)^2}}{2} - \frac{2\delta}{\pi b_\text{п}} \operatorname{arctg} \frac{2\delta}{b_\text{п}} + \frac{h_\text{п}}{b_\text{п}}. \quad (30)$$

Оно обеспечивает хорошую точность, как это будет показано в разделе V, при условии

$$\frac{h_\text{п}}{b_\text{п}} \geqslant 1.$$

Для униполярных генераторов отношение $\frac{\delta}{b_\text{п}}$ имеет второй порядок малости, поэтому (30) значительно упрощается

$$\lambda_\text{ф} = \frac{h_\text{п}}{b_\text{п}} - 0{,}221. \quad (31)$$

Здесь уместно привести выражение для расчета коэфициента рассеяния (по потокосцеплению) обмотки возбуждения, так как вывод ее аналогичен коэффициенту рассеяния полюсов.

Действительно

$$k_\psi = 1 + \frac{\psi_s}{w_\text{е}\Phi},$$

$$k_\psi = 1 + \frac{\mu_0 \lambda_\psi \pi (D_\text{р} + h_\text{п}) F_\text{е}}{\Phi}, \quad (32)$$

где

$$\lambda_\psi = \frac{h_\text{е}}{3b_\text{п}} + \frac{h_\text{п} - h_\text{е}}{b_\text{п}} - 0{,}221,$$

причем

$$\frac{h_\text{п} - h_\text{е}}{b_\text{п}} \geqslant 1,$$

$h_\text{е}$ — высота катушки возбуждения.

# V. ПОТЕРИ В УНИПОЛЯРНЫХ МАШИНАХ

Успешное освоение жидкометаллического контакта позволило в современных униполярных машинах снизить до минимума величину активных потерь; так, для мощных генераторов они составляют всего 2—4%. Однако, несмотря на относительно малые потери, анализ их величины и распределения в машине при проектировании чрезвычайно важен, поскольку от результатов анализа зависит точность теплового расчета машины и выбора оптимальных размеров активной зоны токосъемных устройств.

Потери в униполярной машине целесообразно разделить на две однородные группы: механические и электрические.

К первой группе следует отнести потери трения в жидкометаллической среде токосъемных устройств, в подшипниках и уплотнениях, вентиляционные; ко второй — потери, вызванные протеканием электрического тока в теле ротора, медных токоведущих частях, жидкометаллической среде и переходных соединительных контактах.

Наибольшие трудности вызывает расчет потерь трения в жидкометаллической среде токосъемных устройств, поэтому ниже ему уделяется большое внимание.

## ПОТЕРИ ТРЕНИЯ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ ТОКОСЪЕМНОГО УСТРОЙСТВА КОЛЬЦЕВОГО ТИПА

Потери механического трения в токосъемных устройствах, как правило, составляют существенную долю общих потерь машины. Например, для современного униполярного генератора на скорость вращения 3000 *об/мин* и ток 150 *ка* (расчет приведен в разделе VII) это соотношение составило 24%. В связи с этим желательна повышенная точность их расчета и обоснованный выбор геометрических размеров контактной зоны, от которых в значительной мере зависят эти потери. В работе Ю. Ю. Каунаса [16] дано аналитическое решение задачи определения механических потерь в жидкости, заключенной между поверхностями вращающихся соосных цилиндров. Проведенные им экспериментальные исследования с ртутью, а также сопоставления результатов расчета ряда гидродинамических систем с ранее известными опытными данными других авторов дали хорошие результаты.

Предварительно кратко рассмотрим некоторые положения гидродинамики, необходимые для изложения основного материала.

Принято различать два типа движения жидкости: ламинарное, когда слои жидкости как бы скользят относительно друг друга, и турбулентное, когда ее частицы движутся хаотично. Тот или иной характер движения зависит от некоторой безразмерной величины, которая получила название числа Рейнольд-

са. В общем случае это число определяется следующим образом

$$\mathrm{Re} = \frac{ul}{\nu},$$

где $u$ — скорость движения жидкости;

$l$ — характерный геометрический размер;

$\nu$ — кинематическая вязкость жидкости.

Для интересующего нас вращательного движения системы выражение примет вид

$$\mathrm{Re} = \frac{D^2\omega}{\nu}, \tag{33}$$

где $D$ — диаметр внутреннего цилиндра;

$\omega$ — угловая скорость вращения.

При относительном перемещении частиц жидкости возникают внутренние силы трения, которые придают ей вязкость. Эти силы направлены по касательной к траектории движения частиц. Будучи отнесенными к единице поверхности, силы трения определяют величину напряжения трения $\tau$, которая зависит от коэффициента вязкости жидкости $\varkappa$ и ее градиента скорости, взятого по нормали к направлению движения,

$$\tau = \varkappa \frac{du}{dn}.$$

Упомянутый выше коэффициент кинематической вязкости определяется как

$$\nu = \frac{\varkappa}{\gamma},$$

где $\gamma$ — удельная плотность жидкости.

Установлено, что для всех жидкостей турбулентный характер движения, как правило, наступает при более или менее определенном значении числа Рейнольдса, называемом критическим, которое близко к 2000. В отдельных случаях оно может быть много больше (до 12 000).

Режим работы жидкости в контактных устройствах униполярных машин заведомо будет турбулентным, так как в связи с большими скоростями вращения их роторов числа Рейнольдса составляют порядка от десятков до сотен миллионов.

Для анализа турбулентного движения жидкости около поверхностей в гидродинамике вводится понятие **пограничного слоя.** Несмотря на хаотичный характер движения частиц, принимается, что их средние во времени скорости по отношению к поверхности тела в пограничном слое быстро возрастают от нулевого значения (у поверхности) до величины, равной скорости протекания всей массы жидкости. Подобное распределение скоростей иллюстрирует рис. 63.

Экспериментально было установлено, что для средней скорости в пограничном слое с достаточной точностью можно принять ее изменение по закону степени от расстояния, причем для не очень больших чисел Рейнольдса хорошие результаты дает показатель степени, равный 1/7. При Re $\geqslant$ 200 000 показатель степени следует уменьшить до 1/8.

С учетом сделанных замечаний определим момент трения жидкости, заключенной между двумя поверхностями, одна из которых равномерно вращается с угловой скоростью $\omega$. Решение системы уравнений импульсов для двух пограничных слоев позволяет найти [16] напряжения трения в тангенциальном направлении

$$\tau_1 = 0{,}0178\,\gamma \left(\frac{\nu}{\Delta_1}\right)^{\frac{2}{9}} \cdot [R(\omega - \beta)]^{\frac{16}{9}} \cdot (1 + \alpha_1^2)^{\frac{7}{18}}, \qquad (34)$$

$$\tau_2 = 0{,}0178\,\gamma \left(\frac{\nu}{\Delta_2}\right)^{\frac{2}{9}} \cdot [R\beta]^{\frac{16}{9}} \cdot (1 + \alpha_2^2)^{\frac{7}{18}}, \qquad (35)$$

где $R$ — расстояние частиц жидкости от оси вращения;
$\beta$ — угловая скорость вращения слоя жидкости, заключенной между двумя пограничными слоями (см. рис. 64);
индекс «1» — величина, относящаяся к пограничному слою около вращающейся поверхности; индекс «2» — около неподвижной.

Кроме того, выше обозначено

$$\alpha_1^2 = \frac{5\,\frac{\omega}{\beta} + 45}{204\,\frac{\omega}{\beta} - 16}; \qquad (36)$$

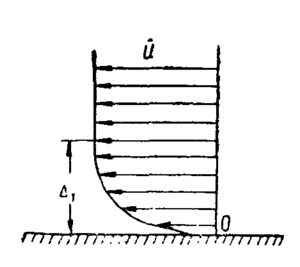



Рис. 63. Изменение скорости частиц жидкости в пограничном слое

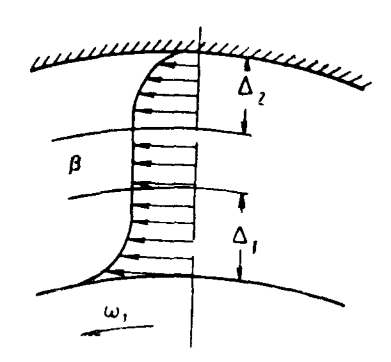



Рис. 64. Изменение скорости частиц жидкости в слое между неподвижной и перемещающейся поверхностями

$$\alpha_2^2 = \frac{5\,\frac{\omega}{\omega-\beta} + 45}{204\,\frac{\omega}{\omega-\beta} - 16}. \tag{37}$$

Толщины пограничных слоев определяют по следующим выражениям

$$\Delta_1 = 0{,}5^{7/11}\,(1+\alpha_1^2)^{7/4}\cdot\left(\frac{\omega}{\omega-\beta}\right)^{2/11}\frac{D_к}{\mathrm{Re}^{2/11}\,k_1^{9/22}}, \tag{38}$$

$$\Delta_2 = 0{,}5^{7/11}\,(1+\alpha_2^2)^{7/4}\cdot\left(\frac{\omega}{\beta}\right)^{2/11}\frac{D_к}{\mathrm{Re}^{2/11}\,k_2^{9/22}}, \tag{39}$$

где

$$k_1 = (1+\alpha_1^2)^{7/22}\cdot\left[\frac{\left(0{,}251\,\frac{\omega}{\beta} + 0{,}586\right)\alpha_1}{0{,}0178\left(\frac{\omega}{\beta} - 1\right)}\right]^{2/11}, \tag{40}$$

$$k_2 = (1+\alpha_2^2)^{7/22}\cdot\left[\frac{\left(0{,}251\,\frac{\omega}{\omega-\beta} + 0{,}586\right)\alpha_2}{0{,}0178\,\frac{\beta}{\omega-\beta}}\right]^{2/11}. \tag{41}$$

На рис. 65 показан поперечный разрез одной из возможных конфигураций контактной зоны токосъемного устройства. Рабочий объем жидкого металла в поперечном сечении образует П-образную фигуру (высотой $H_ж$, шириной $L_к$). Жидкость в данном положении при вращении внутреннего кольца удерживается центробежной силой. Момент трения создается торцевыми и горизонтальными поверхностями контактных колец. При этом для установившейся угловой скорости вращения моменты трения внутренней и наружной поверхностей равны между собой. Применительно к торцевым поверхностям колец справедливы формулы (34—41). Для величин тангенциальных напряжений, возникающих у горизонтальных поверхностей согласно опытным данным в формулах (34) и (35), необходимо ввести поправочный коэффициент 0,8.

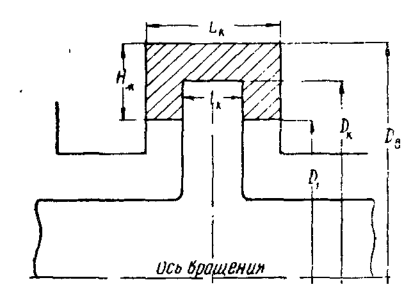



Рис. 65. Кольцевой контакт с П-образным поперечным сечением

Окончательное выражение момента трения рассмотренного варианта токосъемного устройства удобно записать в следующем общепринятом виде

$$M = C \gamma D_к^5 \omega^2, \tag{42}$$

где по [16]

$$C = \frac{10^{-3}}{\mathrm{Re}^{0,182}} \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_к}\right)^{4,64} + \frac{3,7\, l_к}{D_к}\right] \frac{2,26\,\lambda^2 - 0,5\,\lambda - 1,25}{\lambda^2 + 1,5\,\lambda - 2},$$

$$\lambda = \frac{\left(\frac{D_в}{D_к}\right)^{4,64} - \left(\frac{D_1}{D_к}\right)^{4,64} + \frac{3,7\, l_к}{D_к} \left(\frac{D_в}{D_к}\right)^{3,64}}{1 - \left(\frac{D_1}{D_a}\right)^{4,64} + \frac{3,7\, L_к}{D_a}}, \tag{43}$$

причем

$$\mathrm{Re} = \frac{D_к^2\, \omega}{\nu}.$$

Остановимся более подробно на выборе рациональных геометрических размеров контактной зоны токосъемных устройств униполярных машин.

Форма контактных поверхностей, которая была показана на рис. 65, из-за резких изломов граней обладает двумя недостатками. Во-первых, практически такие изломы будут способствовать некоторому повышению потерь трения, а во-вторых (и это главное), распределение плотности электрического тока по контактным поверхностям окажется неравномерным *, что, естественно, не желательно как с точки зрения дополнительного нагрева, так и возможного ухудшения работы контакта. С этой целью контактные контуры поперечного сечения электродов целесообразно принимать с плавными очертаниями, которые технологически наиболее просто выполнить в виде полуокружностей (рис. 66). В этом случае обеспечивается равномерное распределение электрической плотности тока.

Из приведенных ранее формул (34, 35, 38, 39) следует, что величины напряжения трения и толщины пограничных слоев зависят от того, насколько частицы жидкости удалены от оси вращения. Однако применительно к контакту униполярных машин, где геометрические размеры активной зоны примерно на два порядка меньше радиуса токосъемного кольца, с достаточной для инженерных расчетов точностью можно принять расстояние $R$ постоянным, равным радиусу внутреннего кольца $R_к$.

---

* Вопросы токораспределения в контактном слое будут рассмотрены на стр. 90

При этих условиях момент трения внутреннего кольца определится выражением

$$M_1 = 0{,}5\pi D_{\text{к}}^2 s_1 \tau_1, \tag{44}$$

а для наружного кольца получим

$$M_2 = 0{,}5 \cdot \pi \cdot D_{\text{н}}^2 s_2 \tau_2, \tag{45}$$

где $s_1$ и $s_2$ — длины соответствующих контактных линий в поперечном сечении.

После подстановки выражения (38) в (34), а затем в (44) найдем следующую расчетную формулу для момента трения *

$$M_{\text{т}} = 4{,}17 \frac{\gamma \cdot k_{\text{c}}}{\text{Re}^{2/11}} s_1 D_{\text{к}}^4 \omega^2, \tag{46}$$

где

$$k_{\text{c}} = 1{,}94 \cdot 10^{-3} k_1 \left(\frac{\omega - \beta}{\omega}\right)^{\frac{20}{11}}. \tag{47}$$

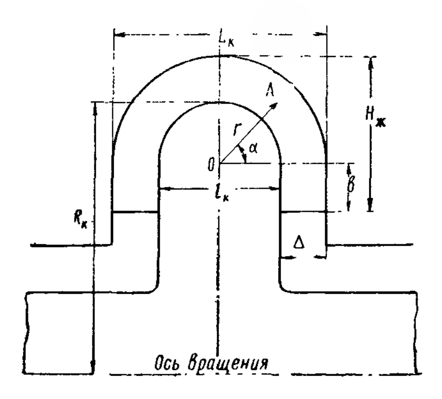



Рис. 66. Кольцевой контакт с плавными очертаниями токосъемных электродов

В выражения (47) и (40) входит отношение угловых скоростей вращения внутреннего кольца к среднему слою жидкости $\frac{\omega}{\beta}$ (см. рис. 64). Для определения указанного отношения воспользуемся условием равновесия моментов $M_1 = M_2$, которое имеет место при установившемся вращении ротора. С этой целью произведем подстановку (34, 38) и (35, 39) в (44) и (45). В резуль-

---

* Выше отмечалось, что для напряжения трения горизонтальных поверхностей следует вводить поправочный коэффициент 0,8. Для очертания контакта на рис. 66 нами был введен средний коэффициент 0,9.

тате после группировки членов получается следующее равенство

$$\left(\frac{\omega-\beta}{\beta}\right)^{\frac{20}{11}} \cdot \frac{k_1}{k_2} = \left(\frac{D_в}{D_к}\right)^{\frac{40}{11}} \frac{s_2}{s_1} . \qquad (48)$$

Обозначим левую и правую стороны равенства через $\lambda$. Если задаться рядом численных значений $\frac{\omega}{\beta}$, то можно получить согласно левому члену (48) и формуле (47) зависимости

$$\lambda = f_1\left(\frac{\omega}{\beta}\right) \text{ и } k_c = f_2\left(\frac{\omega}{\beta}\right),$$

из которых находим

$$k_c = f_3(\lambda).$$

Таким образом, в формулу для момента трения (46) при подстановке $k_c$ через $\lambda$ войдут геометрические размеры контакта. Искомая зависимость $k_c = f_3(\lambda)$, которая была определена указанным выше способом, представлена на рис. 67.

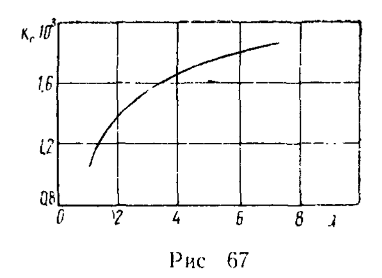



Рис 67

В широком диапазоне изменения $1 \leqslant \lambda \leqslant \infty$ она с высокой степенью точности аппроксимируется полиномом вида

$$k_c = \frac{2{,}26\lambda^2 - 0{,}5\lambda - 1{,}25}{\lambda^2 + 1{,}5\lambda - 2} \cdot 10^{-3} . \qquad (49)$$

В более узком диапазоне $1{,}5 \leqslant \lambda \leqslant 6{,}5$, в котором практически находится $\lambda$, достаточную точность аппроксимации обеспечивает выражение

$$k_c = (0{,}842 + 0{,}295\lambda - 0{,}0223\lambda^2) \cdot 10^{-3} . \qquad (50)$$

В результате момент трения жидкости на одно контактное устройство машины (44) окончательно запишется так

$$M_т = c \cdot \gamma \cdot s_1 D_к^4 \omega^2, \qquad (51)$$

где коэффициент трения

$$c = \frac{4{,}17 \cdot 10^{-3}}{\mathrm{Re}^{0{,}182}} (0{,}842 + 0{,}295\lambda - 0{,}0223\lambda^2), \qquad (52)$$

причем

$$\mathrm{Re} = \frac{D_{\text{к}}^2\,\omega}{\nu}, \quad \lambda = \left(\frac{D_{\text{в}}}{D_{\text{к}}}\right)^{\frac{40}{11}} \frac{s_2}{s_1}. \tag{53}$$

Потери механического трения в контактном **устройстве** определятся по формуле

$$p_{\text{т}} = M_{\text{т}}\,\omega.$$

## МИНИМАЛЬНАЯ ТОЛЩИНА СЛОЯ КОНТАКТНОЙ ЖИДКОСТИ

С целью уменьшения потерь трения в контакте следует стремиться, при прочих равных условиях, к уменьшению длин контактных линий $s_1$ и $s_2$, что может быть достигнуто уменьшением зазора $\Delta$ между контактными поверхностями. Из теории гидродинамики известно, что толщину слоя жидкости $\Delta$ не следует выбирать меньше суммы противолежащих пограничных слоев, так как в противном случае значительно возрастают потери трения в жидкости. Оптимальным зазором $\Delta_{\text{к}}$ будет зазор, равный сумме двух противолежащих пограничных слоев, т. е.

$$\Delta_{\text{к}} = \Delta_1 + \Delta_2$$

или с учетом (38) и (39) можно записать

$$\Delta_{\text{к}} = (a_1 + a_2)\,\frac{D_{\text{к}}}{\mathrm{Re}^{0,182}}, \tag{54}$$

где

$$a_1 = 0{,}5^{7/11}\,(1 + \alpha_1^2)^{7/4} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega - \beta}\right)^{2/11} \cdot \frac{1}{k_1^{4/2}},$$

$$a_2 = 0{,}5^{7/11}\,(1 + \alpha_2^2)^{7/4}\,\left(\frac{\omega}{\beta}\right)^{2/11} \cdot \frac{1}{k_2^{4/2}}.$$

Если задаться рядом значений $\frac{\omega}{\beta}$, то, использовав (36, 37, 39, 40), можно рассчитать зависимость рассматриваемых коэффициентов $a_1$ и $a_2$ в функции от $\frac{\omega}{\beta}$. Воспользовавшись ранее рассчитанной зависимостью $\lambda = f_1\left(\frac{\omega}{\beta}\right)$, можно рассчитать графики этих коэффициентов от $\lambda$ (рис. 68). На этом рисунке дан и суммарный график коэффициента $a = a_1 + a_2$, который определяет оптимальный зазор контакта. Зависимость близка к линейной, поэтому ее удобно в интересующем нас диапазоне $1{,}5 \leqslant \lambda \leqslant 6{,}5$ аппроксимировать прямой линией

$$a = 0{,}108 + 0{,}0081\,\lambda. \tag{55}$$

С помощью выражения (55) определяем коэффициент $a$ после того, как найдено $\lambda$ по (53).

Таким образом, при выборе геометрических размеров контакта следует по (53) определять $\lambda$ и проверить, удовлетворяет ли принятый зазор между контактными поверхностями условию $\Delta \geqslant \Delta_к$, где $\Delta_к$ рассчитывается по (54) и (55).

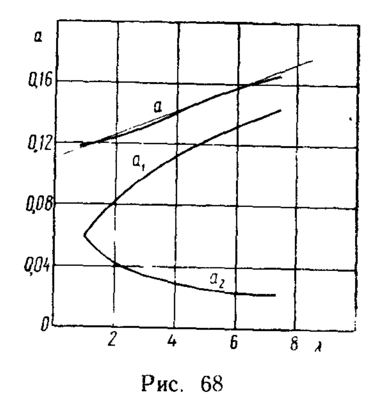


Рис. 68

Рассмотрим методику выбора оптимальных геометрических размеров контактной зоны для основного варианта (рис. 66), если известны $D_к$, $\omega$ и свойства жидкости. В этом варианте контактные линии колец очерчены концентрическими полуокружностями, которые опираются на диаметры $l_к$ и $L_к$ (см. рис. 66).

После несложных преобразований выражения (53) получим (при $b=0$)

$$\lambda = \left(1 + \frac{D_в - D_к}{D_к}\right)^{\frac{40}{11}} \cdot \frac{s_2}{s_1} \approx \left(1 + 3{,}64\ \frac{D_в - D_к}{D_к}\right) \frac{L_к}{l_к},$$

откуда найдем

$$\lambda = \left(1 + 3{,}64\ \frac{\Delta}{R_к}\right) \cdot \left(1 + 2\ \frac{\Delta}{l_к}\right),$$

где $\Delta$ — зазор между контактными поверхностями.

Как показывают расчеты крупных униполярных машин, отношение $\frac{\Delta}{R} \approx 0{,}01$, поэтому в первом приближении можно принять

$$\lambda \approx 1{,}036 + 2{,}072\ \frac{\Delta}{l_к}. \qquad (56)$$

Принимая оптимальное условие для зазора $\Delta = \Delta_к$, после подстановки в (56) с учетом (54) и (55) найдем соответствующее оптимальное значение $\lambda_к$:

$$\lambda_к = \frac{1{,}036\ l_к + 0{,}224\ \dfrac{D_к}{\mathrm{Re}^{0{,}182}}}{l_к - 0{,}0168\ \dfrac{D_к}{\mathrm{Re}^{0{,}182}}}. \qquad (57)$$

Это выражение при известном отношении $\frac{D_к}{\mathrm{Re}^{0{,}182}}$, которое определяется электромагнитным расчетом машины и физическими свойствами жидкометаллической среды, позволяет рассчитать $\lambda_к = f(l_к)$. Далее по (50) и (54), (55) нетрудно определить зависимости $k_c$ и оптимального зазора $\Delta_к$ в функции $l_к$.

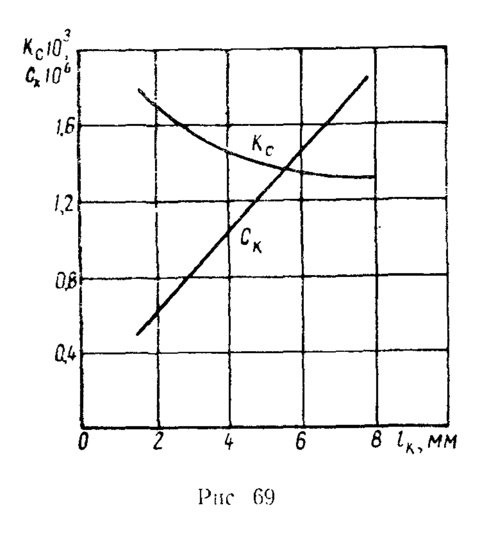



Рис 69

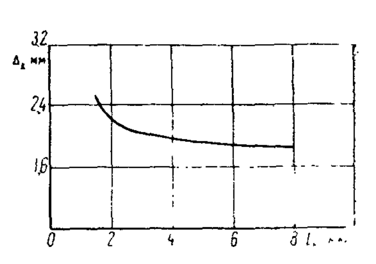


Рис. 70. Зависимость критического зазора от ширины внутреннего токосъемного кольца

Рассчитанные подобным образом графики при условии $\frac{D_к}{\mathrm{Re}^{0,182}} = 2{,}15 \cdot 10^{-2}$ приведены на рис. 69 и 70.

На рис. 69 также дана зависимость для коэффициента *

$$C_к = c\, s_1 = \frac{4{,}17\pi}{2\,\mathrm{Re}^{0,182}}\, l_к\, k_с, \qquad (58)$$

которому при указанных выше условиях пропорционален момент трения (см. 51, 52).

Графики на рис. 69 и 70 показывают, что оптимальный зазор между контактными кольцами незначительно изменяется при вариации ширины внутреннего кольца $l_к$, в то время как момент трения с уменьшением $l_к$ значительно снижается. Однако выбор малого $l_к$ приводит к возрастанию плотности электрического тока в контакте и, следовательно, к повышению электрических потерь в нем. В связи с этим для определения оптимального размера $l_к$ требуется анализ с учетом электрических потерь, который приведен в разделе VII.

## ПОТЕРИ ОТ ТРЕНИЯ В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ И РОТОРА О ВОЗДУХ

Потери от механического трения в двух подшипниках скольжения машины можно определить по формуле [28]

$$P_п = G_р\, v_ц \sqrt{\frac{2\varkappa\omega}{Q_ц}\left(1 + 4\frac{d_ц}{l_ц}\right)}, \qquad (59)$$

* Принято, что $\mathrm{Re} = 4{,}45 \cdot 10^8$.

где $G_р$ — вес ротора;

$\omega$ — угловая скорость;

$v_ц$ — окружная скорость вращения **цапфы**;

$d_ц$, $l_ц$ — диаметр **и** длина цапфы;

$\varkappa$ — вязкость масла;

$Q_ц$ — удельное давление на поверхн**ость цапфы**,

причем

$$Q_ц = \frac{G_р}{2 d_ц l_ц}.$$

Длина цапфы обычно составляет (1—1,5) от ее диаметра. Если принять $l_ц = d_ц$ и учесть, что вязкость масла при рабочей температуре равна 0,067 *н/м²сек*, то выражение (59) после соответствующих подстановок примет следующий вид

$$P_ц = 0{,}58\, d_ц^2\, \omega \sqrt{\omega G_р}. \qquad (60)$$

Следует отметить, что тип смазки подшипника выбирается по численному значению величины $\sqrt{Q_ц v^3}$. Если эта величина составляет 150—300, то применяется кольцевая или дисковая смазка при искусственном охлаждении; если она больше 300, то необходима циркуляционная смазка.

Предварительный диаметр цапфы определяется, исходя из допустимого напряжения на скручивание $\tau_c$, по формуле

$$d_ц = \sqrt[3]{\frac{16\, k_п M_н}{\pi\, [\tau_c]}}, \qquad (61)$$

где $k_п$ — коэффициент перегрузки;

$M_н$ — момент вращения вала.

При расчетах можно принимать

$$[\tau_c] = 59 \cdot 10^6 \ н/м^2.$$

При определении потерь от трения цилиндрического ротора о воздух * можно воспользоваться формулой, полученной на основании опытных данных

$$P_v = c_v\, \omega^3 D_р^5 \left(1 + 5\,\frac{l_р}{D_р}\right). \qquad (62)$$

где $D_р$ — диаметр ротора;

$l_р$ — длина ротора.

Коэффициент трения $c_v$ изменяется в пределах $(1{,}5—3) \cdot 10^{-3}$ в зависимости от шероховатости поверхности ротора и плотности охлаждающего газа.

---

* С небольшой погрешностью формулу можно применять и для случая наполнения машины газообразным азотом.

Общеизвестна также приближенная формула

$$P_v = 57{,}3 \cdot 10^{-3}\, D_р^4\, l_р, \qquad (63)$$

применяемая для потерь рассматриваемого вида.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ

При прохождении тока нагрузки через контактную зону в жидкометаллической среде и пограничных контактных слоях имеет место выделение тепловой энергии (потери мощности). Рассмотрим методику расчета отмеченных потерь, при этом примем во внимание малые размеры контактной зоны по сравнению с диаметром ротора.

При указанном допущении с небольшой ошибкой потери в жидкометаллическом слое определяются согласно выражению:

$$P_{ж.\,э} = \pi D_к \rho \cdot \iint\limits_{(S_к)} j_к^2\, d S_к, \qquad (64)$$

где $D_к$ — диаметр внутреннего кольца;

$\rho$ — удельное сопротивление жидкометаллической среды;

$j_к$ — плотность тока;

$S_к$ — площадь поперечного сечения контакта.

Рассмотрим вариант токосъемного устройства, который показан на рис. 66.

В случае, когда жидкость находится на уровне центра полуокружностей O (которые очерчивают контактные поверхности токосъемных колец), плотность тока будет зависеть только от радиуса $r$, а именно

$$j_к = \frac{I}{\pi r \cdot \pi D_к},$$

где $I$ — ток, проходящий через контактное устройство.

Принимая во внимание, что в полярных координатах

$$dS_к = r \cdot d\varphi \cdot dr,$$

причем

$$\frac{l_к}{2} \leqslant r \leqslant \frac{L_к}{2}, \quad 0 \leqslant \varphi \leqslant \pi,$$

после подстановки приведенных выше выражений в (64) найдем

$$P_{ж.\,э} = \frac{\rho I^2}{\pi^2 D_к} \ln \frac{L_к}{l_к}. \qquad (65)$$

Таким образом, сопротивление одного контактного слоя жидкости

$$r'_ж = \frac{\rho}{\pi^2 D_к} \ln \frac{L_к}{l_к}. \qquad (66)$$

Если жидкость заходит ниже уровня центра полуокружностей на величину $b$, то сопротивление соответствующих двух колец жидкости составит

$$r''_{ж} = \frac{\rho (L_{к} - l_{к})}{4 \pi b D_{к}} . \qquad (67)$$

Суммарное электрическое сопротивление слоя жидкого металла в токосъемном устройстве будет

$$r_{ж} = \frac{r'_{ж} \cdot r''_{ж}}{r'_{ж} + r''_{ж}} . \qquad (68)$$

Потери, которые выделяются при прохождении электрического тока на границе соприкосновения жидкой среды и контактных колец, определяются (на один токосъем) выражением

$$P_{п} = u_{к} I, \qquad (69)$$

где $u_{к}$ — падение напряжения в пограничных контактных слоях. Оно зависит от поверхностной плотности тока и характера соприкасающихся элементов, что учитывается удельным пограничным напряжением.

В свою очередь

$$u_{к} = \varepsilon_{к} j_{к},$$

где $\varepsilon_{к}$ — удельное пограничное напряжение на пару местных контактов.

Соответствующие численные значения $\varepsilon_{к}$ были даны раньше в табл. 7 и 8.

В случае неравномерного распределения плотности тока в контактной зоне задача определения потерь в жидкости и пограничных слоях значительно усложняется.

Рассмотрим вариант токосъемного устройства с П-образным сечением жидкометаллического слоя толщиной $\Delta$ (рис. 65). Для данного случая ответ может быть быстро получен, если воспользоваться результатами решения задачи распределения плоско-параллельного магнитного поля около зубца электрической машины [30], так как при одинаковых граничных условиях имеет место полная аналогия между распределением магнитного потока и растеканием электрического постоянного тока.

Для функции тока имеем *

$$V_{i} = \frac{U_{ж}}{\pi \rho} [\xi + \ln (1 - \xi)], \qquad (70)$$

где $U_{ж}$ — падение напряжения на жидкометаллическом слое. В первом приближении его можно принять постоянным вдоль слоя жидкости, если учесть, что медные контактные кольца име-

* При решении использован метод конформных отображений.

ют на порядок выше электрическую проводимость по сравнению с жидкометаллическим слоем.

В (70) $\xi$ является расчетной функцией отношения $\frac{y}{\Delta}$, которая аналитически не выражается в явном виде. Воспользуемся обратной зависимостью вида

$$\frac{y}{\Delta} = \frac{1}{\pi}\left(\ln\frac{\sqrt{2-\xi}+\sqrt{\xi}}{\sqrt{2-\xi}-\sqrt{\xi}} + 2\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{\xi}{2-\xi}}\right), \quad (71)$$

которая позволяет рассчитать соответствующий график (рис. 72).

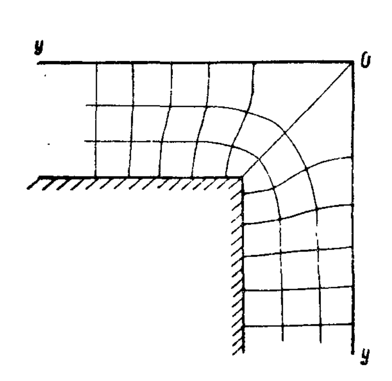



Рис 71. Картина растекания тока в межэлектродном зазоре

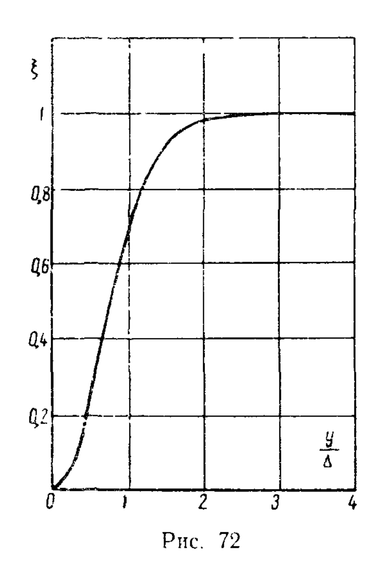



Рис. 72

Здесь $y$ — расстояние, отсчитываемое от угла наружного кольца (0) вдоль его стенки (см. рис. 71);
$\Delta$ — толщина равномерного слоя жидкости между контактными кольцами *.

Таким образом, начиная со значений $\frac{y}{\Delta} = 1{,}5$, наблюдается значительное уменьшение роста $\xi$, а при $\frac{y}{\Delta} \geqslant 2$ с достаточной точностью уже можно считать $\xi = 1$. Это указывает на значительное выравнивание, а затем и постоянство плотности тока с ростом отношения $\frac{y}{\Delta}$.

---

* Если осевой и радиальный зазоры не одинаковы, то формула (71) значительно усложняется.

Действительно, плотность тока определяется как

$$j_{к} = \frac{d\,V_l}{\rho dy},$$

откуда после подстановки (70) находим

$$j_{к} = \frac{U_{ж}}{\pi\rho} \cdot \frac{\xi}{\xi - 1} \cdot \frac{1}{dy/d\xi}.$$

Если по (71) определить нужную производную

$$\frac{dy}{d\xi} = \frac{\Delta}{\pi \sqrt{\xi}\,(1 - \xi)},$$

то после ее подстановки окончательно получим

$$j_{к} = \frac{U_{ж}}{\rho\Delta} \frac{\xi\sqrt{\xi}}{\sqrt{2 - \xi}}, \qquad (72)$$

откуда очевидно постоянство плотности тока при неизменности $\xi$.

Для наглядности распределения плотности тока по поверхности внешнего контактного кольца на рис. 73 дан график $j_{к} = f_{2}(y/\Delta)$ при $\frac{U_{ж}}{\rho\Delta} = 1$, который рассчитан по (72) при использовании ранее данной на рис. 72 кривой $\xi = f_{1}(y/\Delta)$.

Вид кривой (см. рис. 73) показывает, что имеет место значительная неравномерность распределения плотности тока в углах жидкометаллического слоя*. Однако, начиная с отношений $\frac{y}{\Delta} > (1{,}6—2)$, с которыми практически приходится встречаться, имеет место с небольшой ошибкой постоянство плотности тока, т. е. линии тока становятся прямыми. Это позволяет рассматривать П-образный слой жидкости как бы составленным из двух Г-образных слоев, к каждому из которых с достаточной для инженерных расчетов точностью применимы полученные выше данные.

Таким образом, если ширина наружного кольца $2y = L_{к}$, то условие применимости изложенной методики выразится как $L_{к} > (3{,}2 \div 4)\,\Delta$.

Теперь рассмотрим определение эквивалентного сопротивления пограничного слоя.

Из структуры выражения (70) следует, что величина

$$\Upsilon = \frac{1}{\pi\rho}\,[\xi + \ln(1 - \xi)] \qquad (73)$$

является электрической проводимостью жидкометаллического

---

* Нами не учитывается падение напряжения в пограничных контактных слоях, что должно несколько сгладить распределение плотности тока.

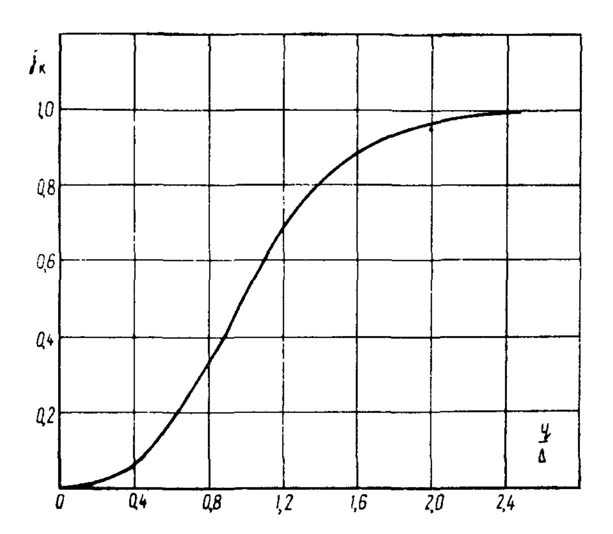



Рис. 73. Распределение плотности тока по внешнему электроду (см. рис. 71)

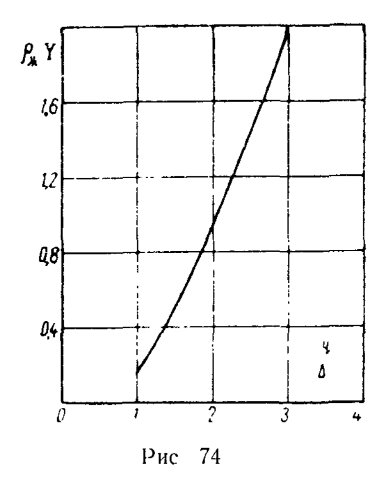



Рис 74

слоя для Г-образного сечения контакта, которая отнесена к единице длины наружного кольца.

На рис. 74 дана зависимость

$$Y \cdot \rho = f_3\left(\frac{y}{\Delta}\right),$$

которая рассчитана по (73) с использованием кривой, данной на рис. 72. Эта зависимость позволяет при заданных размерах смачиваемой линии сечения внешнего кольца и величины зазора

через отношения $\frac{L_к}{2\Delta}$ и $\frac{H}{\Delta}$ определить соответствующие значения $\Upsilon_{\rho ж}$. В результате может быть найдена суммарная проводимость П-образного жидкометаллического слоя на единицу длины кольца

$$\Upsilon_ж = 2\ (\Upsilon_L + \Upsilon_н). \qquad (74)$$

В свою очередь, сопротивление кольцевого слоя жидкости составит

$$r_ж = \frac{1}{\pi D_{к\gamma} \Upsilon_ж}, \qquad (75)$$

а падение напряжения на жидкометаллический слой токосъемного устройства при прохождении тока якоря будет

$$U_ж = r_ж \cdot I. \qquad (76)$$

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В РОТОРЕ

Электрические потери в стали ротора возникают при прохождении через него тока нагрузки, а также в случае неравномерного распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по окружности ротора. Отмеченная неравномерность может быть вызвана наличием полузакрытых пазов на статоре (для компенсационных стержней) либо непостоянством величины воздушного зазора, которое может быть обусловлено технологическими причинами.

При неизменном распределении индукции по окружности ротора в зазоре потери от вихревых токов и на гистерезис в стационарном режиме работы машины не возникают, что объясняется своеобразным «униполярным» характером магнитного поля машины. Для любого замкнутого контура, мысленно проведенного в роторе, э.д.с. при его вращении тождественно равна нулю [75].

Точное определение потерь в стали ротора от тока нагрузки представляет значительные трудности из-за сложной картины растекания в нем тока. В связи с этим воспользуемся приближенным способом расчета потерь, который следует из анализа характера растекания тока между кольцевыми контактами, данным в разделе IV (см. также рис. 54).

Предположим, что рассматриваемые потери слагаются:

а) из потерь от протекания тока в теле цилиндра, который ограничен плоскостями, проходящими через контактные кольца (плотность тока постоянна, т. е. напряжение как бы приложено к этим плоскостям);

б) из потерь от растекания тока в небольшой зоне ротора около контактных колец.

Для потерь в цилиндре получим

$$P_{ц} = I^2 \cdot r_{ц}, \qquad (77)$$

где расчетное сопротивление цилиндра

$$r_{ц} = \rho_c \frac{L_к}{\pi R_р^2},$$

причем обозначено

$\rho_c$ — удельное сопротивление материала ротора (сталь);

$L_к$ — расстояние между контактами.

Определение эквивалентного сопротивления растекания тока нагрузки в зоне около токосъемного кольца ротора облегчается тем, что ширина отмеченного кольца на два порядка меньше радиуса ротора. В связи с этим задачу можно рассматривать как плоско-параллельную, т. е. считать, что $R_р = \infty$, и исходить из токораспределения в плоскости, проведенной вдоль оси вращения ротора.

Удобно воспользоваться готовым решением аналогичной задачи. В частности, известно [26] выражение для электрической емкости на единицу длины для двух плоских соосных эллипсоидов

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\operatorname{arcch}\frac{h_2}{l_к} - \operatorname{arcch}\frac{h_1}{l_к}},$$

где $l_к$ — межфокусное расстояние;

$h_1, h_2$ — большие оси внутреннего и наружного эллипсов соответственно;

$\varepsilon$ — диэлектрическая постоянная среды.

Картина электростатического поля в пространстве между эллипсоидами соответствует таковой для поля растекания электрического тока в изотропной среде. Поэтому при одинаковых граничных условиях формулы для определения электрической проводимости непосредственно могут быть получены из выражения для емкости заменой диэлектрической постоянной на величину, обратную удельному сопротивлению среды.

Для обеспечения геометрических размеров, которые соответствовали бы поставленной нами задаче, необходимо задать следующие условия:

1) положить длину оси внутреннего эллипса, равную фокусному расстоянию, т. е. $h_1 = l_к$;

2) принять в расчет только нижние половинки эллипсов.

В результате для эквивалентной проводимости на единицу длины ротора между внутренним (выродившимся в отрезок линии) эллипсом и внешней половинкой эллипса получим

$$g = \frac{\pi}{\rho_c \operatorname{arcch}\frac{h_2}{l_к}}.$$

Заметим, что линии тока будут представлять собой гиперболы с фокусами, расположенными по концам внутреннего отрезка (рис. 75).

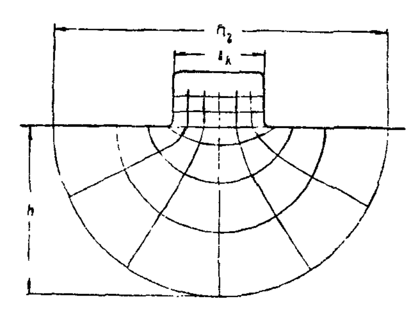



Рис. 75. Растекание тока в стали ротора у основания токосъемного кольца

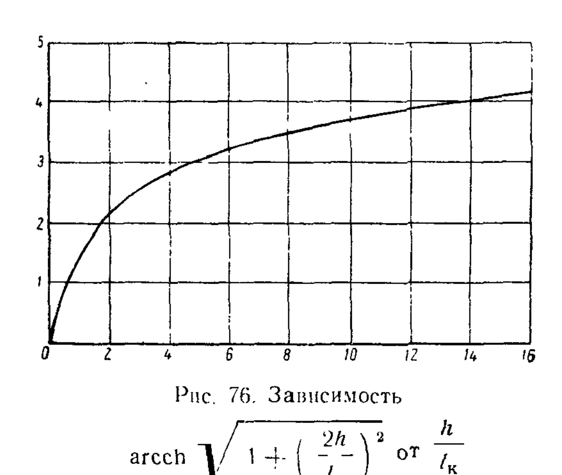



Рис. 76. Зависимость $\operatorname{arcch}\sqrt{1+\left(\frac{2h}{l_к}\right)^2}$ от $\frac{h}{l_к}$

Для эквивалентного электрического сопротивления зоны около всего кольца на расстоянии $h$ найдем

$$r_h = \frac{\rho_c}{\pi^2 D_р} \operatorname{arcch} \sqrt{1+\left(\frac{2h}{l_к}\right)^2}, \tag{78}$$

где большая ось внешнего эллипса $h_2$ была выражена через малую полуось $h$.

На рис. 76 дана зависимость, которая показывает изменение рассматриваемого сопротивления с удаленностью линии внеш-

него эллипса от основания контактного кольца. Нетрудно заметить, что с увеличением отношения $\frac{h}{l_к}$ скорость нарастания сопротивления уменьшается .

За эквивалентное сопротивление растеканию тока около основания кольца можно принять величину $r_h$ при $\frac{h}{l_к} = 10$.

Определение сопротивления внутреннего токосъемного кольца не вызывает затруднений. В случае прямоугольного поперечного сечения кольца очевидно, что

$$r_{вк} = \frac{\rho_c H_к}{\pi D_к l_к}, \qquad (79)$$

где $H_к$ — расчетная высота кольца (расстояние от поверхности ротора до края жидкометаллической «щетки»).

Наряду с рассмотренными выше потерями в роторе от тока нагрузки при определенных условиях на его поверхности могут возникнуть электрические потери от индуктированных вихревых токов. Появление этих токов в стационарном режиме обусловлено возможной неравномерностью распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по окружности ротора. Например, отмеченная неравномерность будет иметь место при наличии на статоре полузакрытых пазов, необходимых для размещения в них компенсационных стержней.

Применение полузакрытых пазов значительно ослабляет магнитное насыщение тонкого цилиндрического слоя стали статора, который прилегает к поверхности расточки статора. Насыщение создается потоком от протекающего по ротору тока нагрузки.

Для компенсации может быть также использован бронзовый цилиндр, прикрепленный к средним полюсам, как это выполнялось в ранних конструкциях униполярных машин. Однако в этом случае при весьма больших номинальных токах современных униполярных машин приходится принимать толщину бронзового компенсационного цилиндра относительно большой. Как показывают соответствующие расчеты, это вызывает существенное увеличение расчетного воздушного зазора машины и, как следствие, повышение мощности обмотки возбуждения. Последнее увеличивает потери в машине и осложняет размещение обмотки в полюсном окне. Указанные недостатки вынуждают отдать предпочтение в мощных униполярных генераторах стержневой конструкции компенсационного устройства.

Поясним методику определения пульсационных потерь на поверхности ротора при наличии зубцов на статоре. Если на статоре имеется $Z$ пазов, то при вращении ротора со скоростью $n$ на его поверхности будут наводиться вихревые точки с частототой $Z \cdot n$. Возникающие при этом пульсационные потери опре-

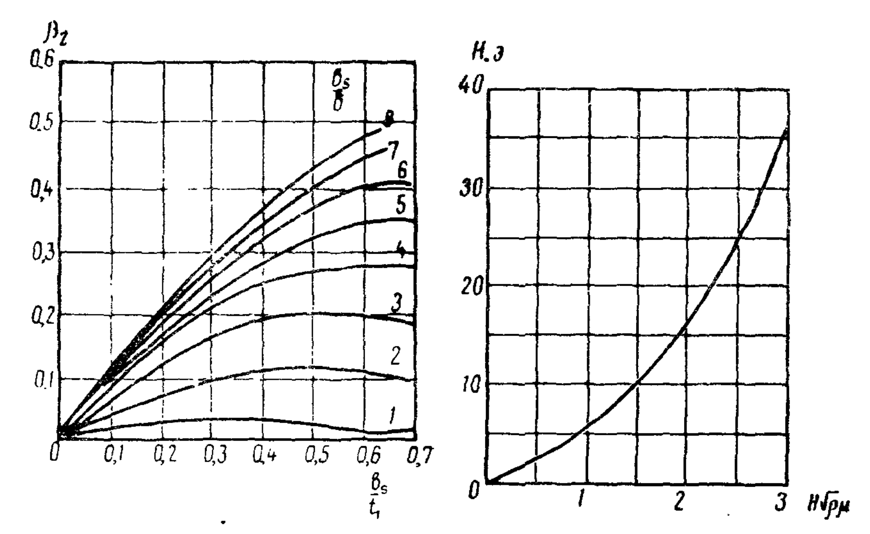



Рис. 77. К расчету потерь на поверхности стали от зубцовых гармоник индукции

деляются следующим выражением, хорошо согласующимся с опытными данными [48]:

$$p_z = 354\, t_1 B_\delta\, Q_\delta\, n\, Z\, \beta_2 H. \tag{80}$$

Здесь коэффициент

$$\beta_2 = f_1\left(\frac{b_s}{t_1},\ \frac{b_s}{\delta}\right)$$

и напряженность поля (в эрстедах)

$$H = f_2\left(H\sqrt{\rho_c \mu}\right)$$

находятся по соответствующим кривым рис. 77; при этом

$$H\sqrt{\rho_c \mu} = 14 \cdot t_1 B_\delta \cdot \beta_2 \sqrt{Z \cdot n}.$$

Выше обозначено

$t_1$ — шаг по пазам;

$b_s$ — открытие паза;

$Q_\delta$ — внутренняя поверхность средних полюсов;

$\delta$ — воздушный зазор под средними полюсами.

Имея в виду формулы (77—80), для полных электрических потерь в роторе окончательно можно записать, что

$$p_{эр} = I^2\left(r_ц + 2r_n + 2r_{вк}\right) + p_z. \tag{81}$$

# VI. УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ В КОЛЬЦЕВОМ ТОКОСЪЕМНОМ УСТРОЙСТВЕ

При работе униполярной машины частички жидкости в кольцевом канале токосъемного устройства подвергаются действию ряда сил. По физической природе можно выделить три категории сил: гравитационная, центробежная от вращения ротора, электромагнитные. Они отличаются по направлению и величине, зависят от таких факторов, как линейная окружная скорость ротора, величина тока нагрузки, протекающего через токосъемное устройство, напряженность магнитного поля в зоне контакта, геометрические размеры кольцевого канала, физические свойства используемой жидкости. В результате сложения действия перечисленных сил на частички возникает давление, которое, как известно, передается между ними и распределяется соответствующим образом в жидкости. Жидкометаллическая среда, ограниченная поверхностями контактных колец, занимает в канале токосъемного устройства определенное равновесное положение. Если жидкометаллическая среда будет «выплескиваться» из рабочей зоны токосъема, то нормальная эксплуатация машины окажется невозможной, так как могут обгореть контактные поверхности. Опасность особенно велика при аварийных токовых перегрузках униполярной машины.

Таким образом, задача исследования влияния указанных выше факторов на устойчивое положение жидкометаллического слоя в токосъемном устройстве приобретает важное практическое значение.

## ГРАВИТАЦИОННЫЕ И ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СИЛЫ

Гравитационная сила, действующая на элемент объема жидкости с массой $m$, равна

$$f_g = mg, \qquad (82)$$

где $g$ — ускорение силы тяжести.

Влияние гравитационной силы на положение жидкости в кольцевом канале существенно только при относительно малых угловых скоростях вращения ротора, когда величины этой силы и центробежной оказываются сопоставимы. При средних и особенно высоких скоростях вращения ротора влиянием гравитационной силы можно пренебречь.

Основным фактором, обеспечивающим положение жидкометаллической «щетки», является действие центробежной силы. В этой связи следует отметить, что для низкоскоростных униполярных машин более целесообразно вертикальное расположение вала, а соответственно и токосъемных устройств, так как форма «щетки» будет обеспечена гравитационными силами.

Вычисление давления в жидкости токосъемного устройства от центробежных сил встречает известные трудности из-за сложного распределения поля скоростей ее частиц (см. раздел V).

В первом приближении давление может быть определено, если соблюдаются следующие условия:

1) небольшие геометрические размеры контактной зоны в поперечном сечении по сравнению с радиусом внутреннего кольца (ротора);

2) постоянные толщины пограничных слоев жидкости около поверхностей токосъемных колец, соответственно $\Delta_1$ и $\Delta_2$;

3) зазор между кольцами удовлетворяет условию

$$\Delta \geqslant \Delta_1 + \Delta_2.$$

В токосъемном кольцевом устройстве униполярной машины движение жидкости, увлекаемой вращающимся кольцом-электродом, носит турбулентный характер. Согласно теории пограничного слоя (см. раздел V), распределение угловых скоростей частиц выражается [16] следующим образом:

около поверхности, вращающейся со скоростью $\omega_1$

$$\omega = (\omega_1 - \beta)\left(1 - \frac{z}{\Delta_1}\right)^{1/8} + \beta, \tag{83}$$

при этом

$$0 \leqslant z \leqslant \Delta_1;$$

для неподвижной поверхности

$$\omega = (\omega_1 - \beta)\left(\frac{z}{\Delta_2}\right)^{1/8}, \tag{84}$$

при этом

$$0 \leqslant z \leqslant \Delta_2.$$

Здесь $z$ — расстояние, отсчитываемое по нормали к рассматриваемой поверхности.

Угловая скорость вращения $\beta$ промежуточного слоя жидкости, имеющего толщину

$$\Delta_3 = \Delta - (\Delta_1 + \Delta_2),$$

как известно, не зависит от $z$ и всецело определяется коэффициентом $\lambda$ (53). Для вычисления в первом приближении давления в жидкости, обусловленного центробежными силами, допустимо принять, что кольцеобразный слой жидкости равномерно вращается на расстоянии $R_к$ от оси как одно целое с некоторой угловой скоростью $\omega_0$. Определим эту скорость как среднеквадратичную величину* расчетных скоростей частиц жидкости в канале

---

* Для приближенной оценки принимают прямо среднюю скорость движения поверхностей электродов, т. е. $0{,}5\ \omega_1$.

$$\omega_0 = \left(\frac{1}{\Delta}\int_0^\Delta \omega^2 dz\right)^{1/2}. \quad (85)$$

После подстановки выражений для скоростей в двух пограничных (83, 84) и промежуточной зонах интеграл равен

$$\frac{4}{5}(\omega_1 - \beta)^2 + \left(\frac{16}{9}\Delta_1 + \frac{8}{9}\Delta_2\right)(\omega_1 - \beta) + \left(\Delta - \frac{1}{9}\Delta_2\right)\beta^2. \quad (86)$$

Значения величин $\Delta_1$, $\Delta_2$ и $\beta$ могут быть вычислены, если известен коэффициент $\lambda$ (см. раздел V). В практически важном случае, когда для уменьшения потерь в жидкометаллической среде зазор между кольцами-электродами выбран равным сумме толщин двух пограничных слоев, имеют место следующие простые соотношения

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \frac{\Delta_к}{2}, \quad \beta = \frac{\omega_1}{2}.$$

После их подстановки выражение (86) приобретает следующий вид

$$\frac{\Delta_к}{2}\left(\frac{121}{180}\omega_1^2 + \frac{13}{9}\omega_1\right).$$

С учетом того что $\omega_1 \gg 1$, окончательно для (85) получим

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{\sqrt{3}}. \quad (87)$$

Для принятых выше условий давление в жидкометаллическом слое будет определяться только расстоянием $h_\delta$ рассматриваемой точки от свободной поверхности жидкости (аналогично гидростатическим задачам, при этом $h_\delta$ является как бы глубиной).

Давление в жидкости от центробежных сил составит:

$$p_ц = \gamma R_к \omega_0^2 h_\delta,$$

где $\gamma$ — удельная плотность жидкости.

Средняя сила давления на площадку $2\pi R_к\Delta_к$ будет

$$f_ц = \frac{2\pi}{3}\gamma R_к^2 \omega_1^2 h_\delta \Delta_к. \quad (88)$$

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ

Эти силы также создают давление в жидкометаллической среде. Они возникают вследствие взаимодействия протекающего через жидкость электрического тока с магнитным полем в рабочей зоне токосъемного устройства. Магнитная напряженность поля в этой зоне создается намагничивающими силами от токов, которые протекают: а) в обмотке возбуждения, б) в теле ротора и жидкометаллическом слое.

Поле в зоне контакта, которое создается током обмотки возбуждения, можно рассматривать как часть поля рассеяния полюсных башмаков. Силовые трубки магнитного потока располагаются в плоскости, проходящей по оси ротора. Величина индукции в случае необходимости может быть определена графическим построением поля *. Учитывая малые размеры зоны контакта по сравнению с размерами межполюсного окна, допустимо принять в первом приближении магнитное поле в рассматриваемой зоне равномерным с некоторой средней индукцией, равной $B_к$.

Не представляет сложности указать направление соответствующей электромагнитной силы. Действительно, вектор плотности электрического тока в жидкометаллической среде расположен в той же плоскости, что и вектор индукции $\bar{B}_к$; поэтому силы, действующие на частицы жидкости, будут направлены нормально к этой плоскости, т. е. по касательной к окружности колец. Естественно, что действие сил в указанном направлении не может «выплеснуть» жидкость из кольцевого канала, поэтому для нас они не представляют интереса.

Вектор магнитной напряженности от тока, который протекает в теле ротора и жидкометаллическом слое, расположен в плоскости, перпендикулярной к оси ротора. На рис. 78 эскизно показаны направления силовых линий электрического тока в плоскости, проведенной по оси ротора. Эти линии приходят от соседнего правого токосъемного кольца, далее проходят контактную зону и направляются к выводным шинам. Если на рис. 78 выделить произвольную трубку тока $dI_к$, то нетрудно установить, что соответствующая электромагнитная сила направлена по касательной к средней линии зазора $aa'$ против часовой стрелки. Естественно, что рассмотренная сила будет стремиться вытолкнуть жидкость из канала. Удобно ввести отсчет по длине линии $aa'$ от правой свободной поверхности жидкости ($a$). Обозначим текущую координату через $s$, а длину всей средней линии через $s_0$.

Плотность тока на уровне линии $aa'$ определится как

$$j_0 = \frac{I}{2\pi R_к s_0}, \qquad (89)$$

где $I$ — ток нагрузки;

$R_к$ — радиус внутреннего кольца.

Электромагнитная сила, действующая на элементарную трубку тока, составит

$$df_э = \Delta\mu_0 H_s \, dI_к, \qquad (90)$$

где $\mu_0$ — магнитная проницаемость;

$H_s$ — напряженность магнитного поля в зоне канала.

---

* Токосъемные кольца выполняются из немагнитных металлов.

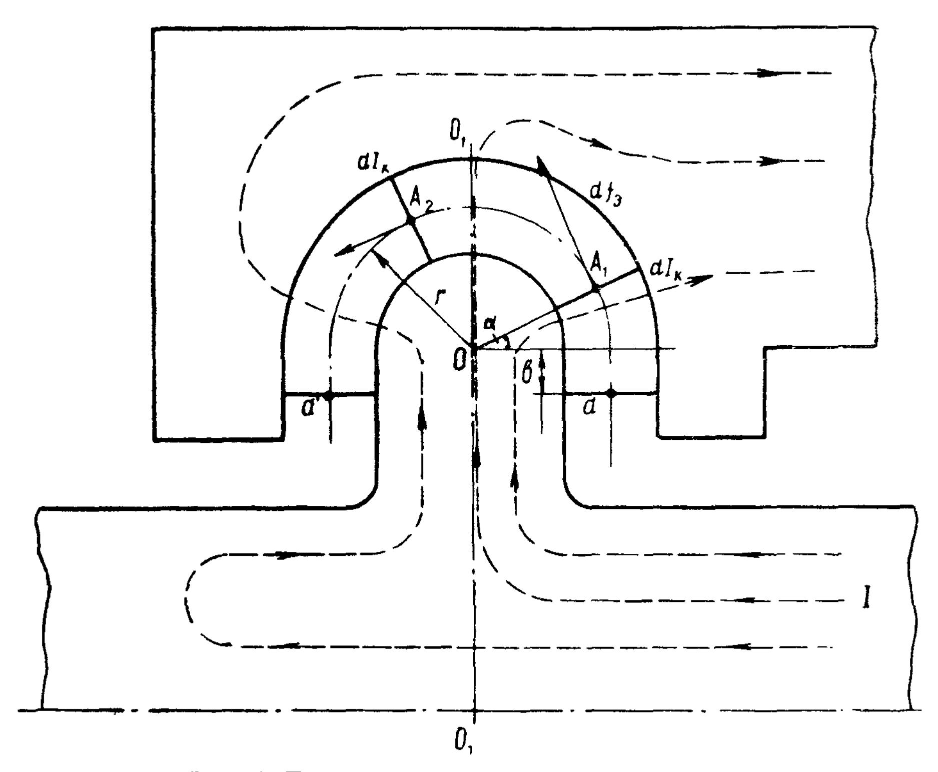



Рис. 78. Протекание тока через токосъемное устройство

На основании закона полного тока для замкнутого контура, охватывающего ротор по каналу токосъемного устройства, получим

$$H_s = \frac{I - j_0 2\pi R_к s}{2\pi R_к}. \tag{91}$$

Ток элементарной трубки можно выразить так:

$$dI_к = j_0 2\pi R_к \cdot ds. \tag{92}$$

После подстановок выражений (91, 92 и 89) в (90) и интегрирования по всей длине поперечного сечения слоя найдем величину искомой электромагнитной силы, которая действует на жидкометаллический слой:

$$f_э = \frac{\Delta\mu_0 I^2}{2\pi R_к s_0} \int\limits_0^{s_0} \left(1 - \frac{s}{s_0}\right) ds,$$

откуда

$$f_э = \frac{\Delta\mu_0 I^2}{4\pi R_к}. \tag{93}$$

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ

При работе униполярной машины жидкометаллическая среда под действием центробежной и электромагнитной сил занимает в канале токосъемного устройства некоторое устойчивое положение, которое определяется условием равновесия отмеченных выше сил, т. е.

$$f_э = f_ц. \tag{94}$$

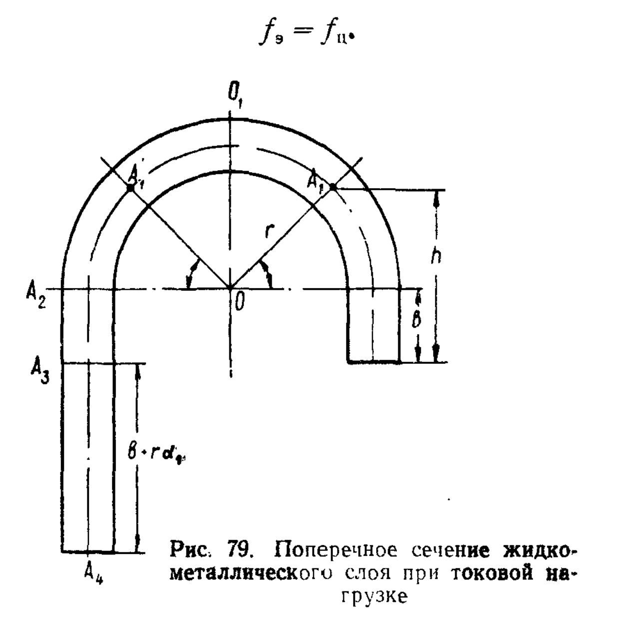



**Рис. 79.** Поперечное сечение **жидкометаллического** слоя при **токовой нагрузке**

Предположим, что при нагрузке машины током, равным $I$, жидкость в кольцевом канале заняла некоторое положение, которое показано на рис. 79. Обозначим разность уровней свободных поверхностей жидкости через $h$. Тогда сила давления кольцеобразного слоя жидкости высотой $h$ от центробежного эффекта, согласно (88), составит

$$f_ц = \frac{2\pi}{3} \gamma R_к^2 \omega_1^2 \Delta_к h. \tag{95}$$

После подстановки в (94) выражений для сил **давления** (93) и (95) можно найти смещение слоя жидкости в **канале**

$$h = 4{,}78 \cdot 10^{-8} \frac{I^2}{\gamma R_к^3 \omega_1^2}. \tag{96}$$

Выражение (96) позволяет также определить предельный ток перегрузки генератора, при котором жидкость полностью перельется в левую часть канала и займет вертикальное положение. Этому случаю соответствует

$$h_m = s_0 = 2b + \pi r. \tag{97}$$

При дальнейшем увеличении тока нагрузки жидкость уже не может удерживаться в канале силой центробежного давления.

Найдем предельный ток в указанном выше смысле, подставив (97) в (96)

$$I_m = 4560\, v_к \sqrt{\gamma R_к s_0}. \qquad (98)$$

где $v_к$ — линейная окружная скорость поверхности токосъемного кольца.

Например, для сплава NaK ($\gamma = 828$ *кг/м*$^3$), взяв следующие данные $v = 120$ *м/сек*, $R_к = 0{,}35$ *м*, $s_0 = 20 \cdot 10^{-3}$ *м*, по (98) найдем, что $I_m = 1320$ *ка*.

Принятые параметры в первом приближении соответствуют построенному фирмой General Electric униполярному генератору с номинальным током 150 *ка*, который способен к десятикратной токовой перегрузке [43].

Такая же высокая перегрузочная способность по току получилась и в приведенных выше расчетных данных, что косвенно может служить подтверждением полученных аналитических результатов.

В заключение следует отметить, что при номинальном токе 150 *ка* смещение слоя жидкости в канале мало. Действительно, использовав численные данные примера, по (96) определим, что $h$ составляет только 0,26 *мм*.

# VII. МЕТОДИКА РАСЧЕТА УНИПОЛЯРНЫХ МАШИН

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ МАШИНЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РОТОРОМ

Выбор основных размеров униполярной машины, так же как других типов электрических машин, не является однозначным. При проектировании, как правило, приходится сопоставлять между собой ряд расчетных вариантов, принимая в качестве критериев для окончательного выбора важнейшие технико-экономические показатели. Ими могут быть коэффициент полезного действия, перегрузочная способность, удельный расход активных материалов и другие. Для освоенных производством типов электрических машин имеется ряд так называемых «машинных постоянных» и электрических соотношений, которые позволяют предварительно выбрать основные геометрические размеры. Для униполярных машин аналогичного материала в настоящее время не имеется. В связи с этим рассмотрим некоторые важные соотношения и характерные зависимости, которые позволяют в первом приближении определить искомые размеры униполярного генератора с цилиндрическим ротором. Принципиальная схема такого генератора показана на рис. 80.

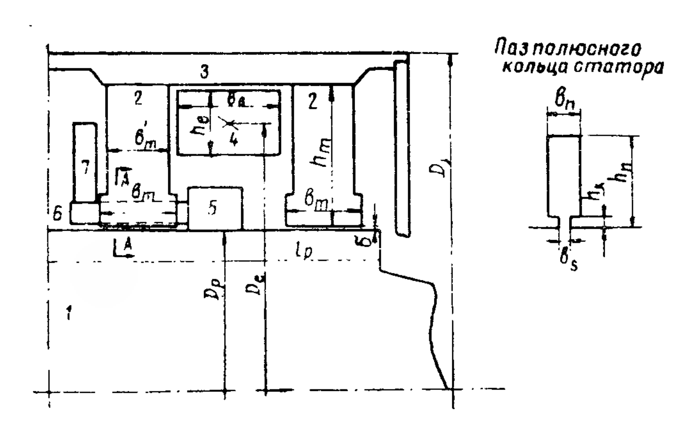



Рис. 80. Конструктивная схема униполярной машины с цилиндрическим ротором

1 — ротор; 2 — кольцевой полюс; 3 — корпус статора; 4 — обмотка возбуждения; 5 — токосъем; 6 — компенсационные стержни; 7 — шинопровод

Как уже отмечалось, униполярная машина в принципе является низковольтной. Ее основной магнитный поток всецело определяется отношением напряжения ротора к скорости вращения $\Phi = \frac{e}{n}$. Если поток известен, то можно найти геометрические размеры магнитной цепи. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Основной магнитный поток определяется выражением

$$\Phi = 2 B_\delta \pi D_р b_m, \tag{99}$$

где $b_m$ — ширина башмака среднего полюса (см. рис. 80).

С целью уменьшения размеров магнитной цепи машины желательно иметь индукцию в воздушном зазоре $B_\delta$ возможно большей. Однако, как показали соответствующие расчеты, ее значение целесообразно выбирать (во избежание значительного увеличения тока обмотки возбуждения) порядка 1,5—1,6 *тл*.

Для оценки магнитного состояния стали ротора униполярного генератора с учетом прохождения большого тока нагрузки была введена (см. раздел IV) средняя расчетная индукция в теле ротора. Для ее определения служила формула (22), а именно

$$B_{r0} = \frac{0,8 B_\delta D_р}{D_р - b_m}. \tag{100}$$

Необходимо правильно выбирать величину индукции $B_{r0}$, чтобы намагничивающая сила, требуемая для проведения магнитного потока через ротор, не оказалась чрезмерно большой.

Данные (см. рис. 61) позволяют сделать заключение, что указанная расчетная индукция не должна быть больше, чем $\frac{B_н}{1,3 : 1,4}$, т. е. 1,5—1,7 *тл*.

Эта рекомендация позволяет в первом приближении принять следующие значения индукций в воздушном зазоре и теле ротора: $B_\delta$ — 1,5 *тл*, $B_{r0} = 1,6$ *тл*. После подстановки указанных численных значений в (100) получим

$$b_m = 0{,}25\,D_р. \tag{101}$$

Используя далее (99), найдем

$$\Phi = 2{,}36\,D_р^2. \tag{102}$$

Полученное выражение позволяет при известном основном потоке определить диаметр ротора генератора. Исключив в (99) $b_m$ с помощью (100), можно получить для диаметра ротора более общее выражение

$$D_р = \sqrt{\frac{\Phi}{2\pi B_\delta (1 - 0{,}8\,B_\delta / B_{r0})}}. \tag{103}$$

Предельное значение диаметра ротора лимитируется условием прочности стальной поковки. Например, для стальных поковок бочек роторов турбогенераторов допускается максимальная окружная скорость не более 160—180 *м/сек*.

Диаметр ротора является определяющим геометрическим параметром униполярной машины, так как остальные размеры (из-за непрерывности основного магнитного потока) с ним тесно связаны *. Это позволяет найти зависимость веса униполярного генератора от диаметра ротора.

Примем индукцию в сердечниках полюсов и ярме статора, равной 1,7 *тл*. Так как их соответствующие поперечные сечения составляют:

$$S_m = S_j = \frac{k_\Phi \Phi}{2B},$$

то после подстановки (102) получим

$$S_m = S_j = \frac{1{,}1 \cdot 2{,}36}{2 \cdot 1{,}7}\,D_р^2 = 0{,}77\,D_р^2. \tag{104}$$

Тогда вес ** ярма статора может быть определен по формуле

$$G_j = 7{,}85 \cdot S_j \cdot 9\,b_m$$

или с учетом (101) и (103)

$$G_j = 13{,}6\,D_р^3. \tag{105}$$

Вес четырех полюсных колец составит

$$G_m = 7{,}85 \cdot 4 \cdot S_m h_m \approx 11\,D_р^3, \tag{106}$$

---

* Соответствующие формулы для расчета даны ниже.

** Ниже вес дается в тоннах.

где высота полюсных колец принята $h = 0{,}45D_р$.

Вес ротора может быть приближенно определен по формуле

$$G_р = 18{,}5\, D_р^3, \qquad (107)$$

а вес щитов корпуса статора согласно

$$G_щ = 0{,}2\, G_j = 2{,}7\, D_р^3. \qquad (108)$$

В результате суммарный вес машины с учетом 20% надбавки на неучтенные конструктивные детали составит

$$G = 55 \cdot D_р^3. \qquad (109)$$

Следующая практически важная задача, которая возникает при расчете электрической униполярной машины,— это определение максимального рабочего тока нагрузки. Длительно допустимый ток якоря главным образом зависит от эффективности принятой системы охлаждения и в первую очередь от скорости отвода тепловой энергии из активной зоны токосъемного устройства*. Необходимо также иметь в виду условие обеспечения устойчивой работы жидкометаллического контакта как с точки зрения физико-химических процессов, так и сохранения положения жидкометаллического слоя в кольцевом канале токосъемного устройства (см. раздел VI). Физико-химическая устойчивость жидкометаллических контактов изучена недостаточно. Основным показателем в этом отношении является допустимая плотность тока на смачиваемой поверхности контакта, которая определяется опытом эксплуатации. Например, для ртутно-никелевого контакта отмеченная плотность тока достигает 50 *а/мм*² [64].

Ограничения по допустимой плотности тока из условия устойчивого положения жидкометаллического слоя скорее имеют значение при определении перегрузочной способности машины по току в аварийных или импульсных режимах. Методика выбора геометрических размеров активной зоны токосъемного устройства будет изложена ниже. При приближенном анализе основных закономерностей для униполярного генератора удобно положить в основу условие постоянства плотности тока в контактах токосъемных устройств. Геометрические размеры контактной зоны токосъемного устройства примем пропорциональными диаметру ротора**. Удовлетворительный тепловой режим униполярной машины обеспечивается заданием соответствующих расходов охлаждающих агентов. Для принятых выше условий получаем, что ток нагрузки пропорционален квадрату диаметра ротора. Так как при постоянстве скорости вращения э.д.с. ротора

---

* Вопросы охлаждения униполярной машины рассмотрены ниже.

** Выбор оптимальных геометрических размеров контактной зоны подробно рассмотрен в этом разделе ниже.

также пропорциональна квадрату его диаметра, то мощность униполярного генератора оказывается пропорциональной четвертой степени.

Таким образом

$$I \equiv D_{\text{р}}^2,\ e \equiv D_{\text{р}}^2,\ P \equiv D_{\text{р}}^4. \qquad (110)$$

Относительный вес машины на единицу мощности с учетом (109) составит

$$g = \frac{G}{P} \equiv \frac{1}{D_{\text{р}}}. \qquad (111)$$

Величина предельного тока $I_m$ по условию сохранения устойчивого положения жидкометаллического слоя в первом приближении оказывается также пропорциональной квадрату диаметра ротора. Это можно показать следующим образом. Оптимальный зазор между токосъемными кольцами (54)

$$\Delta_{\text{к}} = a\,\frac{D_{\text{к}}}{\text{Re}^{0,182}} \equiv D_{\text{к}}^{0,64}.$$

Приближенно можно принять, что длина средней линии жидкометаллического слоя ($s_a$) пропорциональна диаметру внутреннего кольца ($D_{\text{к}}$). Имея в виду выражение (98), получим

$$I_m \equiv R_{\text{к}}^2 \equiv D_{\text{р}}^2.$$

Поскольку рабочий ток пропорционален квадрату диаметра ротора, то для принятых выше условий получаем, что униполярный генератор будет обладать постоянством перегрузочной способности по току $k_i = \frac{I_m}{I_{\text{н}}}$ независимо от диаметра ротора.

В табл. 9 приведены в зависимости от диаметра ротора некоторые характерные данные для униполярного генератора (включая потери в контактных устройствах $p_{\text{к}}$ и общие потери машины $p_{\Sigma}$) при скорости вращения 50 *об/сек.*

Таблица 9

**Основные данные ряда униполярных генераторов**

| $D_{\text{р}}$, *м* | $v$, *м/сек* | $b_m$, *м* | $e$, *в* | $I$, *ка* | $P$, *Мвт* | $G$, *т* | $g$, *кГ/квт* | $p_{\text{к}}$, *квт* | $p_{\Sigma}$, *квт* | $\eta$, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,32 | 50,25 | 0,08 | 12 | 20,0 | 0,24 | 1,8 | 7,5 | 1,34 | 4,7 | 98,0 |
| 0,4 | 78,5 | 0,1 | 19 | 37,5 | 0,71 | 3,6 | 5,07 | 3,34 | 14 | 98,16 |
| 0,6 | 94,2 | 0,15 | 42,5 | 84,5 | 3,6 | 12,2 | 3,39 | 17,2 | 58 | 98,42 |
| 0,8 | 125,5 | 0,2 | 78,0 | 150 | 11,7 | 28,7 | 2,45 | 40,5 | 169 | 98,60 |
| 1,0 | 157 | 0,25 | 118 | 234 | 27,6 | 56,3 | 2,04 | 168 | 537 | 98,1 |

Расчет был выполнен по приведенным выше соотношениям при условии: $n = 50$ *об/мин*, $j_к = 4{,}8 \cdot 10^6$ *а/м*², $B_\delta = 1{,}5$ *тл*.

Обращает внимание сильная зависимость параметров униполярного генератора от диаметра ротора за исключением коэффициента полезного действия.

## ВЫБОР РАЗМЕРОВ ТОКОСЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

От рационального выбора геометрических размеров токосъемных устройств в значительной мере зависит количество тепловой энергии, которое будет выделяться в зоне жидкометаллического контакта. Имея в виду известные трудности охлаждения контактной зоны и желание повысить коэффициент полезного действия машины, целесообразно стремление к уменьшению (насколько это возможно) потерь в токосъемных устройствах. К этим потерям можно отнести потери механического трения жидкометаллической среды и потери при прохождении электрического тока через жидкометаллический слой, контактные поверхности жидкость—металл, токосъемное кольцо ротора.

Анализ показывает, что с уменьшением площади контактной (смачиваемой) поверхности потери трения снижаются, а потери, обусловленные протеканием электрического тока, возрастают. Следовательно, должна иметь место некоторая оптимальная (по условию наименьших потерь) площадь контактной поверхности, величину которой удобно определить по графику.

С этой целью рассмотрим зависимость потерь в активной зоне токосъемного устройства от указанной площади или какого-либо характерного геометрического размера этой зоны. Для токосъемного устройства кольцевого типа, поперечное сечение которого было показано на рис. 66, таким размером является ширина кольца ротора $l_к$. Наиболее удобно рассматривать не сами потери, а соответствующие им эквивалентные сопротивления. Необходимо ранее полученные выражения для потерь разделить на квадрат номинального тока нагрузки. В результате получаются следующие выражения эквивалентных сопротивлений для:

жидкометаллической среды от трения (51, 58)

$$r_т = 6{,}55 \frac{\gamma_ж k_с}{I_н^2 \, \mathrm{Re}^{0{,}182}} D_к^4 \omega^3 l_к ; \qquad (112)$$

жидкометаллического слоя (66)

$$r'_ж = \frac{\rho_ж}{\pi^2 D_к} \ln\left(1 + \frac{2\Delta_к}{l_к}\right) ; \qquad (113)$$

переходного контакта металл—жидкость—**металл** (68)

$$r_п = \frac{2\varepsilon_к}{\pi^2 D_к (l_к + \Delta_к)} ; \qquad (114)$$

токосъемного кольца ротора (79)

$$r_{вк} = \frac{\rho_c H_к}{\pi D_к l_к}. \tag{115}$$

При расчете приходится также дополнительно пользоваться рядом соотношений, полученных ранее (57, 55, 54, 48), а именно

$$\lambda_к = \frac{1,036\, l_к + 0,224 \frac{D_к}{Re^{0,182}}}{l_к - 0,0168 \frac{D_к}{Re^{0,182}}},$$

$$a = 0,108 + 0,0081\, \lambda_к,$$

$$\Delta_к = a \frac{D_к}{Re^{0,182}},$$

$$k_c = (0,842 + 0,295\, \lambda_к - 0,0223\, \lambda_к^2) \cdot 10^{-3}.$$

С достаточной для анализа точностью можно принять

$$D_к = 1,025\, D_р.$$

Расстояние от поверхности ротора до края жидкометаллической «щетки» находится из условия

$$H_к = \frac{\pi (l_к + \Delta)}{4} + 1,2\,\Delta \approx \frac{\pi}{4} l_к + 2\Delta, \tag{116}$$

которое предусматривает возможность полного переливания контактной жидкости в крайнее положение при предельной перегрузке по току (см. раздел VI и рис. 79).

Покажем на примере выбор размеров активной зоны токосъемного устройства для униполярного генератора на ток 150 *ка*, скорость вращения 50 *об/сек* при диаметре ротора 0,8 *м*. Полный электромагнитный расчет дан в этом разделе ниже.

В качестве жидкометаллической среды выбран эвтектический сплав натрия (25%) с калием (75%). Рабочая температура сплава за счет соответствующей его циркуляции поддерживается на уровне 200° С. Наружное токосъемное кольцо — медное, внутреннее — стальное, но покрытое слоем меди. При указанных условиях имеем

$$\rho_{жк} = 42,6 \cdot 10^{-8}\ ом \cdot м,\ \gamma_ж = 828\ кг/м^3,$$
$$\varepsilon_к = 3,2 \cdot 10^{-9}\ вм^2/а.$$

Удельное сопротивление стали токосъемного кольца ротора при 100° С составляет $\rho_c \approx 19 \cdot 10^{-8}$ *ом · м*.

После подстановки в формулы (112—115) приведенных данных получим

$$r_т = 9,3 \cdot 10^{-4} \frac{k_c l_к}{I_н^2},$$

$$r'_{ж} = 5{,}26 \cdot 10^{-8}\, I_{н} \left( 1 + \frac{2\Delta_{к}}{l_{к}} \right),$$

$$r_{п} = 7{,}91 \cdot 10^{-10} \frac{1}{l_{к} + \Delta_{к}}, \qquad (117)$$

$$r_{вк} = 7{,}37 \cdot 10^{-8} \left( \frac{\pi}{4} + 2\frac{\Delta_{к}}{l_{к}} \right).$$

Результаты расчета даны в табл. 12 и 13*.

На рис. 81 показаны зависимости эквивалентных сопротивлений контактной зоны от ширины токосъемного кольца ротора $l_{к}$.

Аналогичные расчеты были проведены для варианта при меньшем диаметре ротора $D_{р} = 0{,}4$ *м* и тока нагрузки 37,5 *ка*

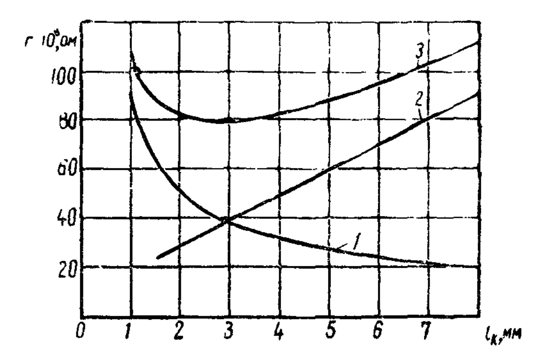



Рис. 81. Зависимости эквивалентных сопротивлений от ширины токосъемного кольца (диаметр ротора 0,8 *м*)
*1* — электрическое сопротивление; *2* — сопротивление трения жидкости; *3* — общее сопротивление

(см. табл. 11). Соответствующие данные приведены в табл. 12 и на рис. 82.

Рис. 81 и 82 позволяют сделать практически важные для проектирования токосъемного устройства выводы:

1. Минимальная величина эквивалентного сопротивления зависит от ширины токосъемного кольца ротора $l_{к}$ и тока нагрузки $I_{н}$; или в более общей формулировке: минимум потерь в контактной зоне зависит от площади смачиваемой жидкометаллической средой поверхности токосъемного кольца и тока нагрузки.

---

* Для случая $D_{р} = 0{,}8$ *м* величины $k_{с}$ и $\Delta_{к}$, можно находить по кривым, которые были рассчитаны в разделе V (см. рис 69, 70).

Таблица 10

**К расчету оптимальных размеров контактной зоны токосъемного устройства ($D_р=0,8$ *м*)**

| $l_к$, *мм* | $\lambda_к$ | $a$ | $\Delta_к$, *мм* | $\kappa_c$ | $H_к$, *мм* | $j_к$, *а/мм²* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 4,24 | 0,142 | 3,08 | 1,69 | 7,73 | 7,29 |
| 2,5 | 3,48 | 0,136 | 2,94 | 1,60 | 7,84 | 6,8 |
| 3 | 3,02 | 0,132 | 2,86 | 1,53 | 8,08 | 6,3 |
| 4 | 2,49 | 0,128 | 2,77 | 1,44 | 8,68 | 5,46 |
| 5 | 2,16 | 0,126 | 2,72 | 1,38 | 9,36 | 4,80 |
| 6 | 1,96 | 0,124 | 2,68 | 1,34 | 10,0 | 4,26 |
| 8 | 1,72 | 0,122 | 2,63 | 1,28 | 11,5 | 3,48 |
| 10 | 1,58 | 0,121 | 2,61 | 1,25 | 13,09 | 2,93 |

Таблица 11

**Эквивалентные сопротивления участков контактной зоны в омах (приведенные данные следует умножить на $10^{-8}$)**

| $l_к$, *мм* | $r_т$ | $r'_ж$ | $r_п$ | $r_{вк}$ | $\Sigma r_к$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2,0 | 29,5 | 7,4 | 15,6 | 28,5 | 81,0 |
| 2,5 | 35,4 | 6,4 | 14,54 | 23,1 | 79,4 |
| 3,0 | 40,75 | 5,61 | 13,5 | 19,9 | 79,8 |
| 4,0 | 51,0 | 4,58 | 11,7 | 16,0 | 83,3 |
| 5,0 | 61 | 3,86 | 10,23 | 13,84 | 88,9 |
| 6,0 | 71,0 | 3,37 | 9,12 | 12,3 | 95,8 |
| 8,0 | 91,0 | 2,67 | 7,45 | 10,6 | 111,7 |
| 10,0 | 111,0 | 2,2 | 6,27 | 9,65 | 129,1 |

2. Для рассмотренных конкретных случаев $D_р=0,8$ *м*, $I_н=150$ *ка* и $D_р=0,4$ *м*, $I_н=37,5$ *ка* имеет место относительно слабо выраженная зависимость потерь от $l_к$. В связи с этим целесообразно выбирать площадь контактной поверхности значительно больше экстремальной, так как в этом случае может быть существенно снижена плотность тока в контакте $j_к$ (см. табл. 10). Кроме того, увеличивается объем жидкометаллического сплава в кольцевом канале токосъемного устройства, что способствует эффективности охлаждения контактной зоны.

Таблица 12

**К расчету оптимальных размеров контактной зоны токосъемного устройства ($D_р$=0,4 *м*)**

| $l_к$, *мм* | $\lambda_к$ | *a* | $\Delta_к$, *мм* | $\kappa_c$ | $H_к$, *мм* | $j_к$, *а/мм²* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 2,93 | 0,132 | 1,83 | 1,514 | 5,23 | 4,85 |
| 2,5 | 2,52 | 0,128 | 1,78 | 1,443 | 5,52 | 4,35 |
| 3 | 2,25 | 0,126 | 1,75 | 1,394 | 5,85 | 3,90 |
| 4 | 1,93 | 0,124 | 1,72 | 1,329 | 6,58 | 3,24 |
| 5 | 1,75 | 0,122 | 1,70 | 1,289 | 7,32 | 2,77 |
| 6 | 1,62 | 0,121 | 1,68 | 1,261 | 8,07 | 2,42 |
| 8 | 1,47 | 0,120 | 1,67 | 1,230 | 9,61 | 1,92 |

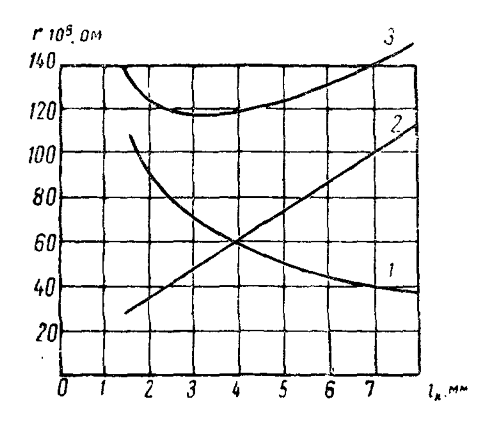



Рис. 82. Зависимости эквивалентных сопротивлений от ширины токосъемного кольца (диаметр ротора 0,4 *м*) Обозначения кривых см. на рис. 81

3. При увеличении тока нагрузки минимум потерь смещается в сторону меньших значений $l_к$ (из-за того, что кривая *1*, рис. 81, опускается вниз) и все большую долю полных потерь в контактном устройстве составляют потери механического трения жидкости. С уменьшением тока, наоборот, минимум потерь смещается в сторону повышенных значений $l_к$, а доля электрических потерь относительно возрастает.

## ОХЛАЖДЕНИЕ КРУПНЫХ УНИПОЛЯРНЫХ МАШИН

В современных униполярных генераторах с жидкометаллическим токосъемом на большие токи общие потери мощности составляют всего 2—3% от их полной мощности. Таким образом, количество выделяющейся тепловой энергии относительно невелико. Несмотря на это, оказывается целесообразным применение высокоэффективных систем непосредственного охлаждения, так как:

1) использование для токосъема больших токов химически активных сред делает необходимым выполнение униполярных машин герметичными, что ухудшает их естественную вентиляцию;

2) значительная часть общих потерь выделяется в небольшой зоне токосъемного устройства, поэтому необходим непосредственный отвод тепловой энергии из этой зоны;

3) шинопроводы на столь большие токи, с какими приходится иметь дело в униполярных генераторах, оказываются весьма громоздкими. Непосредственная система охлаждения водой позволяет значительно уменьшить размеры шинопроводов, а тем самым и габариты машины. Существенна также достигаемая при этом экономия цветных металлов.

Примером машины с интенсивным охлаждением является униполярный генератор на 150 *ка*, построенный фирмой GEC (подробно описан в разделе *III*).

Поскольку эвтектическая смесь NaK обладает довольно высокой теплоотводящей способностью, то для охлаждения активной зоны токосъемных устройств предусматривается ее циркуляция через соответствующие воздушные охладители. Для создания необходимого гидравлического напора могут быть использованы так называемые электромагнитные насосы.

Отвод тепла от шинопроводов и обмотки возбуждения целесообразно осуществлять с помощью замкнутой системы водяного охлаждения. Обмотка возбуждения весьма удобна для непосредственного охлаждения водой, так как она имеет вид кольца с относительно небольшим количеством витков. Химически чистая вода циркулирует по внутренним каналам проводников.

Если сравнить эффективность воздушного и водяного охлаждения, то получим следующие данные [12].

С поверхности в 1 $м^2$ при разности температур в 1° С можно отвести: воздухом при скорости 50 *м/сек* — 140 *кал/ч* тепловой энергии, а водой при скорости 2 *м/сек* и прочих равных условиях — в 20 раз больше тепла, т. е. 2800 *кал/ч*.

Через отверстие в 1 $см^2$ при разности температур 1° С можно отвести: воздухом при скорости 50 *м/сек* — 5 *кал/ч*, а водой при скорости 2 *м/сек* — 700 *кал/ч*.

Для осуществления надежно работающей системы водяного охлаждения электрических машин рекомендуется применять дистиллированную воду, удельное сопротивление которой почти в 40 раз больше, чем у грунтовой воды. Поскольку униполярные машины являются низковольтными, то требования к химической чистоте воды могут быть несколько понижены по сравнению с высоковольтными устройствами.

Так как проводимость воды определяется содержанием положительных и отрицательных ионов, то для ее очистки в настоящее время имеются специальные фильтры весьма простой конструкции [28 а]. Две трубки, последовательно включенные в водопроводную цепь, заполнены одна активированным сульфоуглем (катионитовый фильтр), а другая фенолформальдегидной аминовой смолой или смолой марки ЭДЗ-10П (анионитовый фильтр). При прохождении воды через подобные фильтры ее удельное сопротивление значительно повышается и может достигнуть порядка $10^6$ *ом·см*.

Характерной особенностью электрических машин с непосредственной жидкостной системой охлаждения является значительное повышение уровня допустимых токовых нагрузок с увеличением расхода охлаждающего агента. Например, в крупном электромашиностроении дальнейшие усовершенствования рассматриваемой системы позволяют непрерывно повышать мощность в единице, сохраняя почти неизменными габариты. Аналогичное явление должно иметь место и в униполярных машинах.

Как известно, расход жидкости через гидравлическую систему зависит от напора и ее сопротивления, которое в свою очередь зависит от конфигурации и сечения трубопроводов, а также ряда других факторов. Напор не следует выбирать большим, чтобы не усложнять задачу обеспечения уплотнения мест соединения. В отдельных конкретных случаях может быть использован городской водопровод.

При проектировании системы охлаждения следует иметь в виду, что потери напора обратно пропорциональны диаметру трубок в четвертой степени. Снижение гидродинамического сопротивления может быть обеспечено применением параллельных цепей и устранением резких изменений сечений каналов, а также крутых изгибов трубок.

Тепловой расчет первого приближения систем непосредственного охлаждения относительно несложен [7]. Напомним некоторые основные соотношения. Необходимый расход жидкости (будь то вода или жидкометаллический сплав) для обеспечения заданного температурного перегрева $\theta_\Delta$ охлаждаемой поверхности над средой рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{p}{C \cdot \theta_\Delta}, \qquad (118)$$

где $p$ — потери в охлаждаемой зоне;

$C$ — удельная теплоемкость жидкости.

С другой стороны, расход жидкости через канал пропорционален скорости течения в канале $v$ и гидродинамическому сопротивлению $Z$, т. е.

$$Q = v \cdot Z. \quad (119)$$

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ МЕТАЛЛОВ В УНИПОЛЯРНЫХ МАШИНАХ

Униполярная машина по принципу действия является низковольтной. Казалось бы, существует «простой» способ повышения напряжения — путем создания в машине весьма сильного магнитного поля. Однако для этого требуется поддерживать в обмотках возбуждения довольно большие токи, что вызывает чрезмерные потери. С целью преодоления отмеченной трудности представляется перспективным использование сверхпроводимости проводников. Проводники тороидальной катушки обмотки возбуждения должны охлаждаться до весьма низких температур, в результате чего они приобретают свойства сверхпроводника.

Явление сверхпроводимости металлов было обнаружено в 1911 г. физиком Камерлинг-Оннесом. Еще несколько лет назад оно составляло одну из проблем теоретической физики. В настоящее время уже имеются небольшие модели действующих устройств (в том числе электрических машин и аппаратов), основной частью которых является сверхпроводник, изолированный от окружающей среды и помещенный в специальные холодильные камеры (криостаты).

В 1953 г. Коллинс осуществил интересный эксперимент. Он возбудил ток в свинцовом сверхпроводящем кольце и в течение двух с половиной лет наблюдал за ним. При этом оказалось, что за указанный срок величина тока практически не изменилась.

Рассмотрим основные свойства сверхпроводниковых материалов *.

Электрический ток в сверхпроводнике протекает по «тонкому» поверхностному слою, толщина которого составляет порядка 0,1 *мк*. На такую же глубину проникает электромагнитное поле. Поэтому устройства со сверхпроводниками обладают небольшими размерами.

Важным параметром сверхпроводниковых материалов является величина «критического» поля. Она характеризуется напряженностью либо индукцией магнитного поля, при которых сверхпроводник начинает «восстанавливать» свое сопротивление, несмотря на низкую температуру охлаждения. Следует отме-

---

* Настоящий параграф написан по материалам, представленным инж. В. П. Карцевым по просьбе авторов.

тить, что величина «критического» поля тонкой пленки значительно превышает величину «критического» поля массивного образца (примерно в 50 раз). «Критические» поля для большинства металлов сравнительно малы (порядка 0,01 *вб,м*²).

В последние годы были найдены новые материалы, сохраняющие явление сверхпроводимости при более высоких магнитных полях и температурах. Ряд свойств отличает эти материалы от «обычных» сверхпроводниковых металлов. Ток в так называемых «неидеальных» материалах протекает по всему сечению проводника, точнее по множеству сверхпроводящих «каналов», которые расположены в толще несверхпроводящего материала. Неидеальные сверхпроводниковые материалы обладают высокими «критическими» полями и сохраняют свои свойства при относительно «высоких» температурах. Это хорошо можно видеть из данных, приведенных в табл. 13.

Таблица 13

| Химические соединения | Критическая температура, °K | Критическое поле, *вб/м²* |
|---|---|---|
| $Nb_3Sn$ | 18,06 | 18,3 |
| $Nb_3Ga$ | 14,5 | — |
| $Nb_3Al$ | 17,5 | — |
| $V_3Ga$ | 16,5 | 35 |
| 3NbZr | 11 | 7,7 |
| 2NbTi | 9,1 | 8,2 |
| PbBi | 8,2 | 1,6 |
| $V_3Si$ | 17 | 15,6 |
| MoRe | 12,6 | 2,7 |

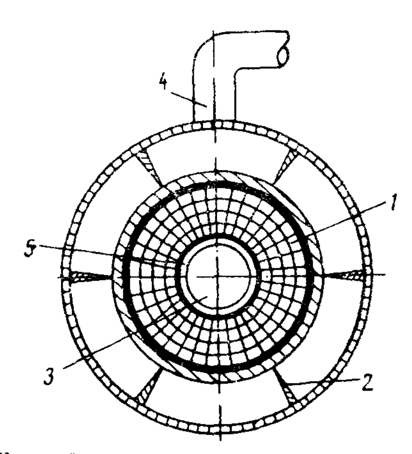



Рис. 83. Принципиальная схема охлаждения обмотки возбуждения до низких температур

Наиболее высоким «критическим» полем обладает $V_3Ga$ (ванадий с галлием), однако это соединение механически непрочно. В настоящее время наиболее пригодными для практического использования являются $Nb_3Sn$ и 3NbZr. Образцы этих материалов изготовляются в виде проволок, стоимость которых в настоящее время пока относительно высока (например, цена 1 *кг* проволоки из сверхпроводникового материала около 300 руб.).

Одна из возможных принципиальных конструкций тороидальной катушки возбуждения показана на рис. 83. Сверхпроводящая обмотка *1* помещена в криостат, стенки которого укреплены с помощью тонких ребер жидкости *2*. Жидкий гелий *3* вводится через патрубок *4* в центральный канал *5*, находящийся внутри проводника. Так как сопротивление сверхпроводника

практически отсутствует, то мощность потребляется только установкой ожижения гелия. Она определяется количеством поступающей к обмотке тепловой энергии (через ребра криостата, его тепловую изоляцию стенок, патрубок, опоры и т. д.).

Отмеченная тепловая энергия (в ваттах) находится по формуле

$$Q = \lambda \frac{S}{l} (T_2 - T_1), \tag{120}$$

где $\lambda$ — коэффициент теплопередачи, *вт/м·град*;

$S$ — поперечное сечение участков, проводящих тепловой поток;

$l$ — длина этих участков;

$T_2$, $T_1$ — температуры снаружи и внутри криостата соответственно, °K.

Для конкретных данных вычисляется общее количество поступающей тепловой энергии. Теплота парообразования жидкого гелия составляет 5,5 *ккал/кг*. По приведенным выше данным может быть определен необходимый расход гелия, способный поддержать температуру проводников обмотки возбуждения, соответствующую температуре его кипения, т. е. 4,2° K. Для оценочных расчетов можно воспользоваться формулой

$$P = 1{,}3 \cdot 10^4 S_к, \tag{121}$$

где $P$ — мощность ожижителя;

$S_к$ — поверхность криостата.

В качестве примера рассмотрим тороидальную катушку с намагничивающей силой в $40 \cdot 10^3$ *а*. Предположим, что катушка помещена в соответствующий тороидальный криостат. Допустимая плотность тока в сверхпроводниках [84] в зависимости от их температуры и материала составляет (3—10) $10^8$ *а/м*$^2$. Если принять в проводниках катушки в качестве расчетной плотности тока $10^8$ *а/м*$^2$, то для поперечного сечения сверхпроводника найдем

$$S = \frac{F}{j_c} = \frac{40 \cdot 10^3}{10^8} = 4 \cdot 10^{-4}\ м^2,$$

где $F$ — намагничивающая сила катушки;

$j_c$ — расчетная плотность тока сверхпроводника.

Далее учтем сечение внутренней трубки для циркуляции жидкого гелия, оценив его в $2 \cdot 10^{-4}$ *м*$^2$. Таким образом, внутренний диаметр криостата составит

$$d_в = \sqrt{\frac{4(4+2)\ 10^{-4}}{\pi}} = 2{,}76 \cdot 10^{-2}\ м.$$

Добавляя удвоенную толщину теплоизоляции криостата, равную $1 \cdot 10^{-2}$ *м*, получим его наружный диаметр

$$d_н = (2{,}76 + 2 \cdot 1)\ 10^{-2}\ м = 4{,}76 \cdot 10^{-2}\ м.$$

Наружная поверхность криостата при среднем диаметре катушки $D_в = 1,3$ *м* составит

$$S_к = \pi d_н \cdot \pi D_в, \quad S_к = \pi^2 \cdot 4,76 \cdot 1,3 \cdot 10^{-2} = 0,61 \text{ м}^2$$

Требуемая мощность ожижительной установки при этом (согласно 121) будет

$$P = 1,3 \cdot 10^4 \cdot 0,61 \approx 0,8 \cdot 10^4 \text{ вт}.$$

## МЕТОДИКА И ПРИМЕР РАСЧЕТА УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РОТОРОМ

Расчет униполярных машин обладает рядом специфических особенностей, основные из которых были рассмотрены выше. В настоящем параграфе дана систематизация выведенных ранее расчетных формул, результат которой представляет собой основу для дальнейшего развития уточненной (по мере накопления опытных данных) методики расчета крупных униполярных машин с цилиндрическим ротором. Одновременно приводится пример расчета униполярного генератора на номинальные данные, которые выбраны близкими к генератору фирмы General Electric [43]. Численный расчет позволяет, с одной стороны, лучше пояснить расчетную методику, а с другой, показать порядок основных величин и параметров униполярных генераторов на большие токи.

В скобках, где это возможно, указаны номера формул, по которым можно найти их вывод в предыдущих параграфах. При расчете используется система единиц MKSA.

В качестве исходных данных для униполярного генератора с цилиндрическим ротором (см. рис. 80) были заданы: скорость вращения ротора $(n)$ — 50 *об/сек*, электродвижущая сила ротора $(e)$ — 78 *в*, рабочий ток $(I)$ — 150 000 *а*.

Основные данные и размеры машины

1. Номинальная мощность

$$P = eI, \qquad P = 78 \cdot 150 \cdot 10^3 = 11,7 \cdot 10^6 \text{ вт}.$$

2. Основной магнитный поток (3)

$$\Phi = \frac{e}{n}, \quad \Phi = \frac{78}{50} = 1,56 \text{ вб}.$$

3. Диаметр ротора (102)

$$D_р = \sqrt{\frac{\Phi}{2,36}}, \quad D_р = \sqrt{\frac{1,56}{2,36}} = 0,81 \text{ м}.$$

Примем $D_р = 0,8$ *м*.

4. Ширина полюса (всего их четыре) (101)

$$b_m = 0{,}25\,D_р,\quad b_m = \frac{0{,}8}{4} = 0{,}2\ м.$$

5. Средняя плотность тока в теле ротора

$$j_a = \frac{4I}{\pi D_р^2},\quad j_a = \frac{4\cdot 150\cdot 10^3}{\pi\cdot 0{,}8^2} = 0{,}3\cdot 10^6\ а/м^2.$$

6. Воздушный зазор между ротором и полюсами статора выбирается минимальным по условию технологии.

Примем $\delta = 5\cdot 10^{-3}$ *м*.

7. Высота полюсного кольца статора

$$h_m = \frac{0{,}9\,D_р - 2\delta}{2},\quad h_m = \frac{0{,}9\cdot 0{,}8 - 2\cdot 5\cdot 10^{-3}}{2} = 0{,}355\ м.$$

8. Полный поток двух обмоток возбуждения

$$\Phi_в = k_ф\,\Phi,\qquad \Phi_в = 1{,}12\cdot 1{,}56 = 1{,}75\ вб.$$

Коэффициент рассеяния $k_ф$ уточняется после расчета магнитной цепи машины.

9. Внешний диаметр статора

$$D_j = \sqrt{\frac{2\,\Phi_в}{\pi B_j} + (1{,}9\,D_р)^2},$$

$$D_j = \sqrt{\frac{2\cdot 1{,}75}{\pi\cdot 1{,}7} + (1{,}9\cdot 0{,}8)^2} = 1{,}72\ м$$

10. Ширина полюсного кольца статора на высоте, равной 0,5 $h_m$:

$$b'_m = \frac{\Phi_в}{2\pi(D_р + 2\delta + h_m)\,B_m},$$

$$b'_m = \frac{1{,}75}{2\pi(0{,}8 + 2\cdot 5\cdot 10^{-3} + 0{,}355)\cdot 1{,}7} = 0{,}141\ м.$$

11. Число и размеры полузакрытых пазов на полюсе статора для компенсационной обмотки. Они выбираются из условий допустимой плотности тока в стержнях и потерь на поверхности ротора.

Примем $Z = 40$. Размеры паза: $b_п = 20$ *мм*, $h_п = 80$ *мм*, $b_s = 5$ *мм*, $h_s = 10$ *мм* (см. рис. 80).

12. Зубцовые шаги на уровнях расточки полюсного кольца и половины высот зубцов

$$t_1 = \frac{\pi(D_р + 2\delta)}{Z},\quad t_1 = \frac{(0{,}8 + 2\cdot 5\cdot 10^{-3})}{40} = 0{,}0637\ м;$$

$$t_{1/2} = \frac{\pi(D_р + 2\delta + h_m)}{Z},\quad t_{1/2} = \frac{(0{,}8 + 2\cdot 5\cdot 10^{-3} + 0{,}08)}{40} = 0{,}070\ м.$$

13. Соответствующие расчетные ширины зубцов:

$$b_{z1} = t_1 - b_s,\quad b_{z1} = 0{,}0637 - 0{,}005 = 0{,}0587\ м;$$

$$b_{z^1/_2} = t_{^1/_2} - b_п,\quad b_{z^1/_2} = 0{,}070 - 0{,}020 = 0{,}050\ м.$$

14. Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta},\quad k_\delta = \frac{0{,}0637 + 10\cdot 5\cdot 10^{-3}}{0{,}0587 + 10\cdot 5\cdot 10^{-3}} = 1{,}045.$$

Расчет магнитной цепи

15. Намагничивающая сила на два воздушных зазора между полюсными кольцами и ротором

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \cdot k_\delta \cdot \delta,$$

$$F_\delta = \frac{2}{4\pi\cdot 10^{-7}}\cdot 1{,}55\cdot 1{,}045\cdot 5\cdot 10^{-3} = 12900\ а.$$

16. Индукция в зубцах полюсного кольца статора

$$B_{z^1/_2} = \frac{\Phi_в}{2Z\, b_{z^1/_2}\cdot b_m},\quad B_{z^1/_2} = \frac{1{,}75}{2\cdot 40\cdot 0{,}05\cdot 0{,}2} = 2{,}19\ тл.$$

17. Соответствующая магнитная напряженность согласно рис. 57.

$$H_z = 31\,200\ а/м,$$

где расчетная длина магнитных силовых линий

$$L_z = 2h_п,\quad L_z = 2\cdot 0{,}08 = 0{,}16\ м.$$

18. Намагничивающая сила на зубцы статора

$$F_z = H_z\cdot L_z,\quad F_z = 31200\cdot 0{,}16 = 5120\ а.$$

19. Напряженность в полюсном кольце для $B_m = 1{,}7$ *тл* составляет $H_m = 7050$ *а/м*.

20. Намагничивающая сила на полюсные кольца статора

$$F_m = H_m L_m,$$

где расчетная длина силовой линии

$$L_m = 2h_m - h_п,\quad L_m = 2\cdot 0{,}355 - 0{,}08 = 0{,}630\ м;$$

$$F_m = 7050\cdot 0{,}63 = 4440\ а.$$

21. Напряженность в ярме статора для $B_j = 1{,}7$ *тл* составляет

$$H_j = 7050\ а/м.$$

22. Намагничивающая сила в ярме статора

$$F_j = H_j L_j,$$

где расчетная длина

$$L_j = 3b_m,\quad L_j = 3\cdot 0{,}2 = 0{,}6\ м;$$

$$F_j = 7050\cdot 0{,}6 = 4230\ а.$$

23. Расчетная индукция в теле ротора при нагрузке (21)

$$B_{r0} = \frac{0{,}8\, B_\delta\, D_р}{D_р - b_m}, \quad B_{r0} = \frac{0{,}8 \cdot 1{,}55 \cdot 0{,}8}{0{,}8 - 0{,}2} = 1{,}65 \text{ тл}.$$

24. Расчетная длина магнитной силовой линии в теле ротора (27)

$$l_{э0} = \left[ l_{mк} + \frac{\pi r}{2} - \frac{2\, r\,(l_{mк} + r)}{D_р} \right],$$

$$l_{э0} = \left[ 0{,}1 + \frac{\pi}{2} \cdot 0{,}1 - \frac{2 \cdot 0{,}1\,(0{,}1 + 0{,}1)}{0{,}4} \right] = 0{,}207 \text{ м},$$

где

$$r = 0{,}5\, b_m, \quad l_{mк} = r,$$

$$r = 0{,}5 \cdot 0{,}2 = 0{,}1 \text{ м}, \quad l_{mк} = 0{,}1 \text{ м}.$$

25. Максимальная магнитная напряженность в роторе (24)

$$H_{rm} = K_н \cdot H_{\varphi m} = \frac{K_н\, I}{\pi\, D_р}, \quad H_{rm} = 0{,}99 \cdot \frac{150000}{0{,}8 \cdot 3{,}14} = 59800 \text{ а/м},$$

где $K_н = 0{,}99$ (по рис. 61).

26. Намагничивающая сила на сталь ротора

$$F_р = H_{rm}\, l_{э0}, \quad F_р = 59800 \cdot 0{,}207 = 12400 \text{ а}.$$

27. Намагничивающая сила обмотки возбуждения при номинальных токе и напряжении:

$$F_в = F_\delta + F_z + F_m + F_j + F_р,$$

$$F_в = 12900 + 5120 + 4440 + 4230 + 12400 = 39090 \text{ а}.$$

28. Коэффициент рассеяния (29)

$$k_ф = 1 + \frac{\mu_0\, \lambda_ф \cdot \pi\, (D_р + 2\delta + h_m)\, F_в}{\Phi},$$

$$k_ф = 1 + \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 3{,}14\,(0{,}8 + 2 \cdot 0{,}005 + 0{,}355)\, 39090}{1{,}56} = 1{,}115.$$

29. Число витков обмотки возбуждения (две катушки соединены последовательно)

$$w_е = \frac{U_е}{\rho\, \pi\, D_е \cdot j_е}, \quad w_е = \frac{78}{2{,}35 \cdot 10^{-8} \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}3 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{+6}} = 542,$$

где удельное сопротивление меди при 100° С $\rho = 2{,}35 \cdot 10^{8}$ ом·м, средний диаметр катушки $D_е = 1{,}62\, D_р$, напряжение катушек $U_е = e = 78$ в, принятая плотность тока в обмотке $j_е = 1{,}5 \cdot 10^6$ а/м².

30. Номинальный ток возбуждения

$$I_е = \frac{2\, F_в}{w_е}, \quad I_е = \frac{2 \cdot 39090}{542} = 144 \text{ а}.$$

31. Поперечное сечение эффективного проводника катушки

$$q_e = \frac{I_e}{j_e}, \quad q_e = \frac{144}{1,5 \cdot 10^6} = 0,96 \cdot 10^{-4} \ м^2.$$

32. Площадь, занимаемая одной катушкой

$$Q_e = \frac{w_e q_e}{2 k_e}, \quad Q_e = \frac{512 \cdot 0,96 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,65} = 0,04 \ м^2,$$

где $\kappa_e$ — коэффициент заполнения обмотки.

33. Высота и ширина катушки

$$h_e = 0,5 \ h_m, \quad b_e = \frac{Q_e}{h_e},$$

$$h_e = 0,5 \cdot 0,355 = 0,18 \ м, \quad b_e = \frac{0,04}{0,18} = 0,222 \ м.$$

## Потери в машине

34. Ширина токосъемного кольца ротора.

Принято $l_к = 5$ *мм* (см. рис. 81).

35. Минимальная толщина жидкометаллического слоя в токосъемном устройстве (53—57)

$$\Delta_к = a \frac{D_к}{\mathrm{Re}^{0,182}},$$

где $D_к = 1,025 \ D_р$ (уточнение см. п. 37), $\mathrm{Re} = \frac{D_к^2 \omega}{\nu}$, $\omega = 2\pi n$,

$$a = 0,108 + 0,0081 \ \lambda,$$

$$\lambda = \frac{1,036 \ l_к + 0,224 \frac{D_к}{\mathrm{Re}^{0,182}}}{l_к - 0,0168 \frac{D_к}{\mathrm{Re}^{0,182}}},$$

$$D_к = 1,025 \cdot 0,8 = 0,82 \ м, \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314 \ 1/сек,$$

$$\mathrm{Re} = \frac{0,82^2 \cdot 314}{45,2 \cdot 10^{-8}} = 4,66 \cdot 10^8,$$

$$\lambda = \frac{1,036 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 0,224 \cdot \frac{0.82}{38}}{5 \cdot 10^{-3} - 0,0168 \cdot \frac{0.82}{38}} = 2,16,$$

$$a = 0,108 + 0,0081 \cdot 2,16 = 0,126,$$

$$\Delta_к = 0,126 \cdot \frac{0,82}{38} = 2,72 \cdot 10^{-3} \ м.$$

Принимаем $\Delta = 3$ *мм.*

36. Минимальное расстояние от поверхности бочки ротора до края жидкометаллического слоя

$$H_к = \left(\frac{\pi}{4} l_к + 2\Delta\right),$$

$$H_к = \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}\right) = 9{,}92 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

37. Наружный диаметр токосъемного кольца ротора

$$D_к = D_р + 2H_к + l_к,$$

$$D_к = 0{,}8 + 2 \cdot 9{,}9 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3} = 0{,}825 \text{ м}.$$

38. Эквивалентное сопротивление трения жидкости **NaK** в контактном слое (58, 50)

$$r_m = \frac{C_к \gamma_ж}{I^2} D_к^4 \omega^3,$$

$$\text{где} \quad C_к = \frac{4{,}17 \cdot \pi}{2} \cdot \frac{l_к k_c}{\mathrm{Re}^{0{,}182}},$$

$$k_c = (0{,}842 + 0{,}295\lambda - 0{,}0223\lambda^2) \cdot 10^{-3},$$

$$k_c = (0{,}842 + 0{,}295 \cdot 2{,}16 - 0{,}0223 \cdot 2{,}16^2) \cdot 10^{-3} = 1{,}38 \cdot 10^{-3},$$

$$C_к = \frac{4{,}17 \cdot 3{,}14 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-3}}{2{,}38} = 1{,}19 \cdot 10^{-6},$$

$$r_m = \frac{1{,}19 \cdot 10^{-6} \cdot 828}{(150 \cdot 10^3)^2} \cdot 0{,}82^4 \cdot 314^3 = 61 \cdot 10^{-8} \text{ ом}.$$

39. Электрическое сопротивление жидкометаллического слоя

$$r'_ж = \frac{\rho_ж}{\pi^2 D_к} \ln\left(1 + \frac{2\Delta}{l_к}\right),$$

$$r'_ж = \frac{42{,}6 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 \cdot 0{,}82} \ln\left(1 + \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-5}}\right) = 4{,}15 \cdot 10^{-8} \text{ ом}.$$

40. Сопротивление переходного контакта медь—NaK—медь

$$r_п = \frac{2\varepsilon_к}{\pi^2 D_к (l_к + \Delta)},$$

$$r_п = \frac{2 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-9}}{\pi^2 \cdot 0{,}82 (5 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3})} = 9{,}9 \cdot 10^{-8} \text{ ом}.$$

41. Сопротивление стального кольца ротора токосъемного устройства

$$r_{вк} = \frac{\rho_c H_к}{\pi D_к l_к},$$

$$r_{вк} = \frac{19 \cdot 10^{-8} \cdot 9{,}9 \cdot 10^{-3}}{3{,}14 \cdot 0{,}82 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 14{,}6 \cdot 10^{-8} \text{ ом}.$$

42. Потери в активной зоне токосъемных устройств (на пару)

$$p_к = 2I^2 (r_m + r'_ж + r_п + r_{вк}),$$

$$p_к = 2(150 \cdot 10^3)^2 \cdot (61 + 4{,}15 + 9{,}9 + 14{,}6) \cdot 10^{-8} = 40{,}5 \cdot 10^3 \text{ вт.}$$

43. Сопротивление растеканию тока в теле ротора в зоне токосъемного кольца ротора

$$r_h = \frac{\rho_c}{\pi^2 D_к} \cdot \ln \frac{0{,}08}{l_к},$$

$$r_h = \frac{19 \cdot 10^{-8}}{3{,}14^2 \cdot 0{,}8} \ln \frac{0{,}08}{0{,}005} = 6{,}69 \cdot 10^{-8} \text{ ом.}$$

44. Потери растекания тока в теле ротора в зоне токосъемных колец ротора

$$p_h = 2(150 \cdot 10^3)^2 \cdot 6{,}69 \cdot 10^{-8} = 3 \cdot 10^3 \text{ вт.}$$

45. Расчетное сопротивление бочки ротора

$$r_ц = \rho_c \frac{4 L_1}{\pi D_р^2},$$

где расстояние между контактными кольцами ротора

$$L_1 = 4 b_m, \quad L_1 = 4 \cdot 0{,}2 = 0{,}8 \text{ м.}$$

$$r_ц = 19 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4 \cdot 0{,}8}{\pi \cdot 0{,}8^2} = 30{,}2 \cdot 10^{-8} \text{ ом.}$$

46. Потери в бочке ротора (77)

$$p_ц = I^2 r_ц,$$

$$p_ц = (150 \cdot 10^3)^2 \cdot 30{,}2 \cdot 10^{-8} = 6{,}8 \cdot 10^3 \text{ вт.}$$

47. Поверхностные потери в стали ротора от полей **зубцовых** гармонических статора (80)

$$p_z = 354 \; t_1 B_\delta Q_\delta n Z \beta_2 H,$$

$$\frac{b_s}{t_1} = \frac{0{,}005}{0{,}0637} = 0{,}0785, \quad \frac{b_s}{\delta} = \frac{0{,}005}{0{,}005} = 1.$$

Согласно рис. 77 (а) находим, что $\beta_2 = 0{,}01$.

Далее $$H\sqrt{\rho_c \mu} = 14 t_1 B_\delta \sqrt{Z \cdot n} \cdot \beta_2,$$

$$H\sqrt{\rho_c \mu} = 14 \cdot 0{,}0637 \cdot 1{,}55 \cdot \sqrt{40 \cdot 50} \cdot 0{,}01 = 0{,}618.$$

По рис. 77 (б) находим, что $H = 3{,}5$ *э*.

$$Q_\delta = \pi D_р \cdot 2 b_m, \quad Q_\delta = \pi \cdot 0{,}8 \cdot 2 \cdot 0{,}2 = 1{,}08 \text{ м}^2$$

$$p_z = 354 \cdot 0{,}0637 \cdot 1{,}55 \cdot 1{,}08 \cdot 50 \cdot 40 \cdot 0{,}01 \cdot 3{,}5 = 2{,}5 \cdot 10^3 \text{ вт.}$$

48. Сопротивление стержней компенсационной обмотки

$$r_a = \rho \cdot \frac{1{,}2 \cdot 2 b_m}{Z \cdot q_a},$$

$$r_a = 2{,}35 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1{,}2 \cdot 2 \cdot 0{,}2}{40 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-3}} = 22{,}6 \cdot 10^{-8} \text{ ом.}$$

49. Электрические потери в стержнях компенсационной обмотки

$$p_a = I^2 \cdot r_a,$$

$$p_a = (150 \cdot 10^3)^2 \cdot 22{,}6 \cdot 10^{-8} = 5{,}1 \cdot 10^3 \text{ } вт.$$

50. Сопротивление обмотки возбуждения

$$r_e = \rho \frac{l_e w_e}{2 q_e}, \quad l_e = \pi \cdot 1{,}3 = 4{,}09 \text{ } м.$$

$$r_e = 2{,}35 \cdot 10^{-8} \frac{4{,}09 \cdot 542}{2 \cdot 0{,}96 \cdot 10^{-4}} = 0{,}271 \text{ } ом.$$

51. Электрические потери в обмотке возбуждения

$$p_e = 2 I_e^2 r_e,$$

$$p_e = 2 \cdot 144^2 \cdot 0{,}271 = 11{,}25 \cdot 10^3 \text{ } вт.$$

52. Потери на трение в двух подшипниках скольжения (60)

$$p_п = 0{,}58 \, d_ц^2 \, \omega \sqrt{\omega G_р},$$

где
$$d_ц = \sqrt[3]{\frac{16 K_п P}{\pi (\tau) \omega}}, \quad G_р = 182 \cdot 10^3 D_р^3,$$

$$G_р = 182 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8^3 = 93 \cdot 10^3 \text{ } н,$$

$$d_ц = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 4 \cdot 11{,}7 \cdot 10^6}{\pi \cdot 59 \cdot 10^6 \cdot 314}} = 0{,}244 \text{ } м.$$

Принимаем $d_ц = 0{,}25$ м

$$p_п = 0{,}58 \cdot 0{,}25^2 \cdot 314 \sqrt{314 \cdot 93 \cdot 10^3} = 61{,}5 \cdot 10^3 \text{ } вт.$$

53. Потери на трение ротора о воздух (63)

$$p_v = 57{,}3 \cdot 10^3 D_р^4 l_р,$$

где
$$l_р = 8 \, b_m, \quad l_р = 8 \cdot 0{,}2 = 1{,}6 \text{ } м$$

$$p_v = 57{,}3 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8^4 \cdot 1{,}6 = 37{,}6 \cdot 10^3 \text{ } вт.$$

54. Полные потери в машине

$$p_\Sigma = p_к + p_h + p_ц + p_z + p_a + p_e + p_п + p_v,$$

$$p_\Sigma = 40{,}5 + 3 + 6{,}8 + 2{,}5 + 5{,}1 + 11{,}25 + 61{,}5 + 37{,}6 = 168{,}25 \text{ } квт.$$

55. Коэффициент полезного действия генератора

$$\eta = 1 - \frac{p_\Sigma}{p + p_\Sigma},$$

$$\eta = 1 - \frac{168{,}25}{11700 + 168{,}25} = 0{,}986$$

## Некоторые весовые данные

56. Вес компенсационной обмотки

$$G_a = 22 \, Z q_a \cdot b_m,$$

$$G_a = 22 \cdot 40 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}2 = 0{,}22 \ т.$$

57. Вес двух катушек возбуждения

$$G_e = 45{,}5 \ w_e q_e D_р,$$

$$G_e = 45{,}5 \cdot 542 \cdot 0{,}96 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}8 = 1{,}9 \ т.$$

58. Общий вес генератора

$$G = 55 \ D_р^3,$$

$$G = 55 \cdot 0{,}8^3 = 28 \ т.$$

59. Относительный вес машины

$$g = \frac{G}{P}, \quad g = \frac{28 \cdot 10^3}{11700} = 2{,}4 \ кГ/квт.$$

60. Маховой момент ротора

$$GD^2 = 0{,}575 \cdot G'_р D_р^2,$$

где $G'_р = 12{,}3 \ D_р^3$, $G'_р = 12{,}3 \cdot 0{,}8^3 = 6{,}3 \ т$,

$$GD^2 = 0{,}575 \cdot 6{,}3 \cdot 0{,}8^2 = 2{,}32 \ тм^2.$$

61. Инерционная постоянная машины

$$H_j = 10 \cdot \frac{GD^2 \cdot n^2}{P}, \quad H_j = 10 \cdot \frac{2{,}32 \cdot 50^2}{11700} = 4{,}96 \ сек.$$

### Тепловой расчет обмотки возбуждения

62. Расход воды на охлаждение одной катушки возбуждения

$$Q = \frac{0{,}5 \cdot p_e}{C \cdot \theta'_\Delta},$$

где $\theta'_\Delta$ — перегрев охлаждающей жидкости в канале (примем 20° С)

$$Q = \frac{5{,}625 \cdot 10^3}{4{,}13 \cdot 10^6 \cdot 20} = 68 \cdot 10^{-6} \ м^3/сек.$$

63. Сечение и диаметр канала.

Примем скорость течения жидкости в канале $v = 1{,}0$ **м/сек.**
Число параллельных каналов $n = 4$.

$$S_к = \frac{Q}{n\,v}, \quad d_к = \sqrt{\frac{4}{\pi} S_к}.$$

$$S_к = \frac{68 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 4} = 0{,}17 \cdot 10^{-4} \ м^2,$$

$$S_к = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 0{,}17 \cdot 10^{-4}} = 0{,}465 \cdot 10^{-2} \ м,$$

Примем $d_к = 5 \cdot 10^{-3} \ м.$

64. Коэффициент сопротивления трения для турбулентного трения

$$\xi_т = \frac{0,316}{Re^{0,25}},$$

где число Рейнольдса $Re = \frac{v \cdot d_к}{\nu_в}$,

$$Re = \frac{1 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{55,6 \cdot 10^{-8}} = 9 \cdot 10^{3},$$

$$\xi_т = \frac{0,316}{(9 . 10^{3})^{0,25}} = 0,0324.$$

**65. Падения напора жидкости в каналах**

$$h_\Delta = \xi_т \cdot \frac{L_e}{d_к} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \cdot 10^{-1},$$

**где длина канала** $L_e = \frac{\pi D_e w_e}{2n}$, $L_e = \frac{\pi \cdot 1,3 \cdot 542}{2 \cdot 4} = 276$ *м*,

$$h_\Delta = \frac{0,0324 \cdot 276 \cdot 101 \cdot 1^2 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 9 \ кГ/см^2.$$

66. Критерий Нуссельта

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4},$$

где критерий Прандтля при 50° С $Pr = 3,56$.

$$Nu = 0,023 (9000)^{0,8} \cdot 3,54^{0,4} = 55,5.$$

67. Коэфициент теплопередачи

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d_к},$$

$$\alpha = \frac{55,5 \cdot 0,647}{5 \cdot 10^{-3}} = 7190 \ вт/м^2 \cdot град.$$

68. Перепад температуры от стенок канала к охлаждающей жидкости

$$\Theta''_\Delta = \frac{0,5 \, p_e}{\alpha F},$$

где $F = \pi d_к L_e$, $F = \pi \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 276 = 4,35$ $м^2$.

$$\Theta''_\Delta = \frac{5,625 \cdot 10^3}{7190 \cdot 4,35} = 0,18 \ °C.$$

69. Максимальный перегрев меди при протекании воды по каналам

$$\Theta_m = \Theta'_\Delta + \Theta''_\Delta,$$

$$\Theta_m = 20 + 0,18 = 20,2 \ °C.$$

70. Максимальная температура меди проводника

$$\Theta'_m = \Theta_{вх} + \Theta_m,$$

где $\theta_{вх}$ — температура входящей в каналы воды.

$$\Theta'_m = 40 + 20,2 = 60,2\ ^\circ C.$$

## ЛИТЕРАТУРА


1. Алабышев А. Ф., Грачев К. Я., Зарецкий С. А., Лантранов М. Ф. Натрий и калий. Госхимиздат, 1959.
2. Алиевский Б. Л. Униполярные электрические машины. Информационный технический сборник, 1959, № 10, стр. 29—37.
3. Алиевский Б. Л. Современные конструкции и области применения униполярных машин. Научные доклады высшей школы. Электромеханика и автоматика. Изд. «Советская наука». М., 1959, № 2.
4. Алиевский Б. Л., Бертинов А. И. К расчету униполярных генераторов с полым ротором, ГосИНТИ, № 20-63-526/13, М., 1963.
5. Алиевский Б. Л., Бертинов А. И. и Барлей В. В. Расчет сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных цилиндров при униполярном намагничивании.— «Электричество», 1964, № 2.
6. Андреев П. А. и др. Жидкометаллические теплоносители ядерных реакторов. Судпромгиз, 1959.
7. Анеподистов В. П., Анеподистова Н. Н. Исследование внутреннего водяного охлаждения. Сб. работ по вопросам электромеханики. Вып. 4. Изд-во АН СССР. 1960.
8. Беляев Л. Н. Новые униполярные машины.— «Электричество». 1959, № 6.
9. Бертинов А. И., Алиевский Б. Л., Троицкий С. Р. Определение главных размеров и «коэффициента использования» униполярных машин цилиндрического и дискового типа. ГосИНТИ, № 20-63-526/13, М., 1963.
10. Бертинов А. И., Алиевский Б. Л. Схема расчета цилиндрических униполярных генераторов постоянного тока. ГосИНТИ, № 20-63-526/13, М., 1963.
11. Бертинов А. И., Алиевский Б. Л., Хан В. Х. Схема расчета дисковых униполярных генераторов постоянного тока. ГосИНТИ № 20-63-526/13, М., 1963.
12. Брон О. Б., Итенберг Д. С. Проблемы жидкостного охлаждения электрических аппаратов. Сб. «Электросила», ГЭИ, 1959, № 18.
13. Городский Д. А. Можно ли сделать многовитковую униполярную машину?— «Электротехника», 1964, № 2.
14. Долидзе Д. Е. Неустановившееся вращающееся движение вязкой несжимаемой жидкости в круглом кольце. Труды Второго Всесоюзного съезда. I—II. 1963 г. Известия АН СССР, ОТН.
15. Каунас Ю. Ю. Исследование ртутного контакта для униполярных машин. (Автореферат диссертации). Литовская сельскохозяйственная академия. Каунас. 1954
16. Каунас Ю. Ю. Сопротивление трения для цилиндрических тел, вращающихся в жидкости. Труды Каунасского политехнического института. Т. VI, 1957.
17. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. ГЭИ, 1949.
18. Костин Б. В. Новый униполярный генератор.— «Электричество», 1939, № 2.
19. Костин Б. В. Новое об униполярной индукции.— «Электричество», 1939, № 10—11.
20. Куиц И. С. О конструкции униполярных генераторов на большую силу тока.— Бюллетень ВЭИ, 1940, № 4.

21. Кутателадзе С С. и др. Жидкометаллические теплоносители. М, Атомиздат, 1958

22. Миткевич В. Ф Основные условия возникновения индуктированной э.д.с. (Материалы конференции ОТН АН СССР и Главэлектропрома на Ярославском электромашиностроительном заводе). М.—Л. АН СССР, 1940.

23. Мозжерин В. Г. Низковольтные униполярные генераторы. Труды Ивановского энергетического института. Т. II—III. Оборонгиз. 1940.

24. Мозжерин В. Г. Машинная постоянная низковольтных униполярных генераторов. Сб. научных трудов Ивановского энергетического института. Вып. 8, 1958.

25. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Ч I, ГЭИ, 1959, стр. 89.

26. Нейман Л. Р, Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Ч. III, ГЭИ, 1918.

27. Погожев С. А. К вопросу об униполярных машинах. Сб. научных трудов Ивановского энергетического института. Вып. 7, 1957.

28. Постников И. М. Проектирование электрических машин. Изд. техн. литер. УССР. Киев, 1952 г.

28а. Шкроб М. С. Водоподготовка. М., 1952.

29. Рогачев И. С. и Керчик Л. Д. Униполярный коммутаторный генератор. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1958, № 9.

30. Сборник работ по вопросам электротехники. Вып. 4 Изд-во АН СССР, 1960.

31. Справочник химика. Госхимиздат. Т. 2, 1951.

32. Тамм И. Е. Основы теории электричества. 1956, стр. 213, 550.

33. Толвинский В. А. О связи между униполярными и коллекторными типами электрической машины постоянного тока. Труды ЛПИ. ОНТИ — Ленинград. 1950, № 3.

34. Шенфер К. И. Униполярные машины и применение постоянных магнитов в электромашиностроении. М —Л. Академиздат, 1940

35. Чайлдс И. Физические постоянные. Физматгиз, 1962.

36. Acyclic generators, a practical d.c. power source for high current, low voltage application (booklet). General Electric Company, Schenectady, N. Y.

37. Acyclic unit generates d.c. directly FCR.— „Chem. Engineering", 1961, 68, №№ 24, 58, 60.

38. Aigrain P. „Bull. Soc. franç. Electr.". 8 serie, 1960, vol. 2, p. 441.

39. d'Albon G. Cesar Parteni. Perfectionarea grupurilor turbogeneratoare cu generatoare unipolare.— „Bull. Inst. Polytechnique". Iaşi, vol. 11, 1956, p. 253. „Editions de l'Academie Populaire Roumaine", 1953, p. 498.

40. Barnes A. H., Smith F. A., Whitham G. K. Large current homopolar generator. U. S. A. „Ec Report ANL" 4361. U. S. Atomic Energy Commission, Washington, D—C, 1949.

41. Blamey I. W., Carden P. O., Hibbard L. U., Inall E. K., Marshall R. A., Oliphant Mark. The large homopolar generator at Canberra initial tests.— „Nature" (Engl.), 1962, 195, № 4837, p. 113—114.

42. Boning P. Unipolarmotor.— ETZ. 1952, № 3.

43. 150 000 continuous d.c. ampes easy for acyclic generator.— „Power Engineering", 1962, 66, № 1.

44. Een I., Kamal H. New homopolar motor. Franklin Institute, Philadelphia, Pa., 1954, July, pp. 7—20.

45. Ever see a homopolar generator.— „Power", 1956, 100, № 3, p. 136.

46. Föttinger H. Uber die Flussigkeitsreibung umlaufender Scheiben, Zylinder und Zellenkörner.— „Zamm", 1937.

47. Gigot E. Applying unipolar generators.— Allis-Chalmers Electrical Review, 1962, 27, № 2.

48. Giebs W. J. Tooth-ripple losses in unwound poleshoes.— „The Journal of the Instit. of Electrical Engineers". 1947, vol. 94, Part II, № 37, p. 2—12.

49. Grawford T. J. Kinetic Energy Storage for resistance welding.— „Engineer", 1948, III, vol. 33, p. 36.

50. Grawford T. J. Homopolar generator for resistance welding.— „Welding Journal", 1950, vol. 29, p. 211.
51. Greenhill M., Skeats N. Homopolar generators and liquid Metal brushes.— AERE, 1957, № 92.
52. Gupta A. K. Design of self-compensated high-current comparatively higher voltage homopolar generators.— „Power Apparatus and Systems", 1961, Oktober, № 56, p. 567—573.
53. Gupta A. K. Commutatorless d. c. generators capable to supply currents more the one million amperes, and the effect of heavy overload on them.— „Power Apparatus and Systems", 1962, Oktober.
54. Gupta A. K. Unipolar machines. Association of the magnetic field with the fieldproducing magnet.— „American Journal Physics", 1963, 31, № 6, 428—430.
55. Haznisch R. Die Unipolarmachina. Prinzip, Geschichte und heutiger Stand.— „Electro-Technik". 1958, 40, № 10.
56. Homopolar generator to excite synchrocyclotron at Carnegie Techn.— „Power Generation", 1949, Nov., III, p. 70.
57. Holm R. Electric Contact Handbook. Berlin—Göttingen—Heidelberg. Springer-Verlag, 1958.
58. Howe G. H. A new homopolar design.— „Wireless Engng". 1952, Nov., p. 1—3.
59. Is homopolar generator now practical?— „Power", 1949, vol. 93, № 10, p. 107.
60. Камачата. Ом дэики дзасси.— „Ohm. Electr. Mag.", 1957, 44, № 6, 670. (Япон.).
61. Kaunas J. J. Gyvsidabrinio kontacto unipoliarinei masinai tyrimas, disertacija, Kaunas, 1953.
62. Klaudy P. Eigenschaften und Anwendungsmoglichkeiten Flüssigkeitskontakten.— ETZ-A, 1955, Bd 76, S. 525.
63. Klaudy P. Stromabnahme bei hohen Gleitgeschwindigkeiten.— „Maschinenbau und Wärmewirtschaft", 1956, S. 315.
64. Klaudy P. Fortschritte im Bau von Unipolarmaschinen durch Anwendung von Flüssigkeitskontakten.— „Electrotechnik und Maschinenbau", 1961, 78, № 3, S. 123—143.
65. Klaudy P. Schnellaufende Unipolarmaschinen—derzeitige und in Zukunft zu erwartende Anwendungsmöglichkeiten.— „Osterr. Ingr.—Z.", 1963, 6, № 5, 154—163.
66. Ku I. H., Kamal A. A new homopolar motor.— „Journal of the Franklin Institute", 1954, vol. 258, № 1.
67. Lamme B. G. Development of a successful d. c. 2000 kW unipolar generator.— AIEE, Transactions, 1912, June, 28, vol. 31, pt II, pp. 1810—40.
68. Lanoy H. La génératrice homopolaire „Poirson".— „Electrotechn. Hydraul. Radio", 1956, № 214, 23—29.
69. Liquid metal turns the tide to high d. c. generation.— „Iron Age" 1961, 188, № 21.
70. Muers E. H Unipolar generator. Westinghouse.— „Engineer", 1956, vol. 16, p. 59—61.
71 Oliphant M. The acceleration of protons to energies above 10.— „Gev. Proceedings of the Royal Society", 1956, vol. 234, № 1199.
72. Oprendeck B., Sora I., Matlak I. Dimensionarea optimá și posibilitățile de folosire a mașinii omopolare ca generator tahometric.— „Buletinul stiintific și tehnic al institutului politehnic Timișoara", 1962, vol. 7 (21) (румынск.).
73. Parrin F., Christian. Sur un nouveau modele de dynamo—unipolaire auto—excité.— „Electrotechnique. Comptes Rendus des Séances de l'Academie des Sciences". 1962, 13 août, vol. 255, № 7.
74. Poirson.— „Rev. Gen. Electr.", 1938, p. 608; Bull. Soc. franç. Électr., 1938, p. 785.
75. Poulain J. Recents developpements des machines acycliques á courant continu.— „Bull. Soc. franç. Electriciens", 1961, Nov., № 23.

76. Quichaud G. Etude d'un mutateur á rotor fluide.— „Bull. Soc. franç. Electriciens", 1963, 4, № 48, p. 725—732.
77. Reulos R. Courant mamgnétique et relativité.— Nouvelle théorie des machines unipolaires.— „Archiv. Scienties", 1957, 10, № 4, p. 545—573.
78. Recenti realizzazioni nel campo della generazione aciclica.— „Elettrotecnica", 1962, 49, № 6, p. 396—398.
79. Rabotti G. Dinamo omopolari u corrente continue.— „L'Elettrotecnica", 1947, vol. 34, № 4.
80. Salagean T. Dimensionarea generatoarelor unipolare cu rotor bobinat.— „Electrotehnica", 1955, № 2—3, p. 73—78.
81. Schröter F. Der Übergangswiderstand von Schleifkontakten.— „ETZ-A", 1955, Bd 76, Hf. 14.
82. Schröter F. Zur Theorie des Stromüberganges bei Schleifkontakten.— „ETZ-A", 1958, Bd 79, Hf. 14.
83. Strough R. I., Schrader E. F. Pulsed air core series disk generator for production of high magnetic fields.— „Review of Scientific Instruments", 1951, vol. 22, p. 578.
84. Supraleitende Magnetspulen.— „ETZ-B", 1962, Bd 14, Hf. 26, S. 705—708.
85. Tokan O. Unipolarni dynamo.— „Electrotechnik", 1957, 12, № 6, 202.
86. Ugrimoff B. Die unipolare Gleichstrommaschine, Berlin, Springer-Verlag, 1910.
87. Usaf. Facility uses million amp. test to prove.— „Thermal Barrier" conditions.— Allis-Chalmers Sales News, 1958, Febr.
88. Vandenberg L. Homopolar generator pump for liquid metals.— USAEC Report. AECD. 3368 (KAPL-590). 1951, p. 83;— „Power Eng.", 1950, 54, p. 60—61; „Ind. Arts. Index", 1951, p. 505.
89. Watt D. A. A homopolar generator for high current low voltage d. c. supply. AERE Report ED/R 1843. Atomic Energy Research Establishment, Harwell, England, 1956, Jan., Declassified edition of AERE CE/R 821, 1951 (52).
90. Watt D. A. Liquid metal brushes.— „AERE Report" CE/R 820. 1951, Nov., (Declassified Jan. 1956).
91. Watt D. A. The development and operation of a 10 kW homopolar generator with mercury brushes. J. Institution of Electrical Engineers, London, 1958, June, p. 233.
92. Widmar N. Die Erzeugung von Gleichstrom sehr grosser Stromstärken durch Unipolarmaschine.— „Brown Boveri Mitt.", 1940, № 8, S. 155—157.
93. Zorn M. Unipolarmachine für kleine Spannungen und hohe Ströme.— „ETZ", 1940, № 16, S. 358—60.
94. Zorn M. Gleichstrommaschinen ohne Stromwender.— „E. und M.", 60 Jahg., H 23/24, Übersicht.

ПАТЕНТЫ

95. Арьякас Г. Я. Униполярная машина. Пат. 1846. 22. III 1920. № 76777.
96. Владос М. Х. и Кантер А. С. Униполярная машина постоянного тока Пат. 10544, 14. XI 1927. № 20866.
97. Дален Г. и Гультквист А. Сдвоенная динамомашина униполярного типа. Пат. 9960. 5. I 1900.
98. Заев Н. Е. Униполярная машина. Авт. св. 88921. 12. XII 1949. № 409029.
99. Заев Н. Е. Униполярная машина постоянного тока. Авт. св 97411. 28. VII 1925. № 5383/417047.
100. Иванов И. П. Униполярная машина. Авт. св. 60357. 4. III 1940. № 30615.
101. Коваленков В. И. и Аспин И. М. Авт. св. № 42191. 16 XII 1934. № 199072.
102. Костин Б. В. Униполярная машина. Авт. св. № 51189. 23. V 1936. № 194592.

103. Костин Б. В. Униполярная машина. Авт. св. 52585. 29. X 1936. № ТП—1757.
104. Костин Б. В. Униполярная машина. Авт. св. 64967. 13. IV 1940. № 31595/302122.
105. Костин Б. В. Униполярная машина. Авт. св. 60959. 7. VI 1940. № 33842.
106. Купцов З. Г. Физический прибор для демонстрирования униполярной индукции. Авт. св. 52184, 21. X 1936. № ТП—1332.
107. Пермяков И. Г. Униполярная машина. Пат. 2187, 5. XI 1924. № 781.
108. Потапов Ю. В. Жидкометаллическое контактное устройство для быстроходных униполярных машин. 23. I 1961. № 694896/24—7.
109. Рогачев И. С., Лившиц А. Л., Перчик Л. Д. Машинный генератор униполярных импульсов тока. 2. XII 1952. № 1597/450510.
110. Сапельков Л. И. Униполярная машина постоянного тока. Пат. 6413. 3. VIII. 1926. № 9926.
111. Синицин С. Т. Униполярная динамомашина постоянного тока. Пат. 1773. 18. IX. 1924. № 79109.
112. Торопов О. Н. Униполярная машина. Авт. св. 55493. 19. X. 1938. № 636.
113. Цирлин Ю. Л. Тахогенератор типа униполярной машины.3. 1960. № 657074/24.
114. Штейнгауз Л. Н. Гибкий проводник для последовательного соединения униполярных дисковых машин. Пат. 7096. 2. XI. 1926. № 1×21382.
115. Dynamo-electric machines. United Kingdom Atomic Energy Authority. Англ. пат. кл. 35. № 728458, 20.04.55.
116. Dynamo homopolaire. André-Louis-Octave Fauchon-Villeplee. Фр. пат. кл. 12,5. № 1204304, 25.01.60.
117. Janiczek Stefan. Homopolarna maszyna pradu Stalego dowolvie wysokiego napiecia, zwalaszera generator lub silnik duzej mocy. Польск. пат. кл. 21d', 6, № 44923, 21.09.61.
118. Klaudy Peter. Regelbare Unipolarmaschinen, besonders für Drehmomentenwandler. Австр. пат. кл. 21d, 51, № 218699, 11.12.61.
119. Mezunovich A. Unipolar generator. Англ. пат. кл. 35. № 724247, 16.02.55. Пат. США. кл. 310—178, № 2755398.
120. Mockers P., Valdin E. Alternateur à fer tournant á autoexcitation. Фр. пат. кл. 12,5, № 1140967, 22.08.57.
121. Neculau Alexandru. Masina unipolara de curent continuu. Рум. пат. кл. 21d', 6, № 41100, 11.07.1959.
122. Schwall August. Flüssigkeitsgleitkontakt. Siemens—Schuckert werke Akt. Ges., Пат. ФРГ. кл. 21d, 64/01, № 1094354, 8.06.61.
123. Sellers John F., Brill Edward F. Unipolar dynamoelectric machine with sleeve mounted field coil.— Allis—Chalmers Manuf. Co., кл. 310—178, № 2786155, 19.03.57.
124. Stadler F. Unipolarmaschine (Siemens—Schuckertwerke A. G.). Пат. ФРГ, кл. 21d', 6, № 949753, 27.09.56.
125. Stanicek Z. Vertikalni elektricky storj, zejmena unipolarni dynamo. Чех. пат. кл. 21d', 5, № 84777, 1.10.55.
126. Ringland W. Insulation for air gap of unipolar generator. Allis-Chalmers Manuf. Co.). Пат. США, кл. 310—178, 29.04.58.
127. Unipolar generator. Current transfer systems. United Kingdom Atomic Energy Authority. Англ. пат. кл. 35. № 728445, 20.04.55.
128. Lee William H. Homopolar generator. Пат. США. кл. 310—178. № 2990485, 27.06.61.
129. Суэмацу Тосио. Униполярные генераторы постоянного тока с жидкостным контактом. Японский пат. кл. 55А22 № 4658, 31.03.56.
130. Иноуэ Киёси. Униполярный генератор, Японский пат. кл. 55А22, № 6358, 12.08.58.

# СОДЕРЖАНИЕ